



**Pedro Emanuel Vela
dos Reis**

**Furação de Materiais Compósitos de Matriz
Polimérica**

DOCUMENTO PROVISÓRIO



**Pedro Emanuel Vela
dos Reis**

**Furação de Materiais Compósitos de Matriz
Polimérica**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

o júri

presidente

Prof. Dr. José Joaquim de Almeida Grácio
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

vogais

Prof. Dr. Carlos Alberto da Conceição António
Professor Associado com Agregação da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Dr. João Paulo Davim Tavares da Silva
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Em primeiro lugar desejo expressar o meu reconhecido agradecimento ao Prof. João Paulo Davim Tavares da Silva, supervisor e orientador científico deste trabalho, pelo apoio, incentivo e disponibilidade com vista à realização desta dissertação.

Agradeço também ao Eng.º Gil Cabral pelo apoio e disponibilidade que sempre manifestou durante a redação desta dissertação.

Ao Eng. António Festas pelo apoio na realização dos ensaios experimentais.

Ao projecto de investigação “Optimization of the Machining of Polymeric Matrix Composite based on Numerical and Experimental Models” - POCTI 32684/99 financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro pelos meios disponibilizados na elaboração deste trabalho.

Ao Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial - **INEGI**, na pessoa do Prof. Doutor António Torres Marques pela cedência do material compósito laminado para teste.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto pela cedência do Dinamómetro Piezoeléctrico Kistler® 9272.

De uma forma muito especial à minha família pelo incansável apoio e motivação.

palavras-chave

furação, compósitos de matriz polimérica, matriz termoendurecível, fibras de vidro e carbono, dano, acabamento de superfície, forças de corte

resumo

A furação de materiais compósitos é fundamental na integração estrutural. Contudo, a execução de furos requer um cuidado especial dado que estes materiais são significativamente afectados pela tendência de sofrerem delaminação (*dano típico*) quando sujeitos à acção de forças de corte, nomeadamente a força de avanço, reflectindo-se de uma forma directa na resistência do material.

Neste trabalho pretende-se avaliar o comportamento na furação de três tipos de materiais compósitos de matriz polimérica. Um compósito de matriz epóxida reforçado a fibras de carbono e dois compósitos de matriz poliéster reforçados a fibras de vidro, obtidos por diferentes processos de fabrico, *autoclave* e *moldação manual*. Utilizaram-se brocas de geometria convencional e especial.

Pretendeu-se efectuar uma avaliação comparativa do desempenho das brocas nos diferentes materiais compósitos ao nível da qualidade de superfície obtida no furo (*defeito de delaminação e acabamento de superfície*) e do processo de corte (*forças e potência de corte*).

Foram aplicadas técnicas estatísticas, nomeadamente a análise de variância (ANOVA) e a regressão linear múltipla, com o objectivo de avaliar a influência dos parâmetros processuais (*velocidade de corte e avanço*) e estabelecer um modelo de previsão para o dano, acabamento de superfície no furo e forças de corte desenvolvidas durante o processo.

Finalmente, foram efectuados testes de confirmação com vista a validar os resultados previstos através do modelo.

keywords

drilling, polymeric matrix composites, thermosetting matrix, glass and carbon fibers, damage, surface quality, cutting forces

abstract

Drilling is a frequently practiced machining process in industry owing to the need for component assembly in mechanical structures. However, drilling composite materials requires a special attention due to fact that materials are significantly affected by the tendency to delaminate under action of cutting forces, namely thrust force, which directly affect the composite's structural integrity

It was intended with this work to evaluate the drilling of three polymeric matrix composite materials. One carbon fiber reinforced plastic and two glass fiber reinforced plastics manufactured with different processes, *autoclave and hand lay-up*. Drills with conventional and special geometry have been used.

It was purposed to carry out a comparative evaluation of drills performance on the different composite materials involving surface quality obtained on the hole (*delamination and surface finishing*) and process of cut (*forces and power of cut*).

Statistical techniques have been used, nominated the analysis of variance (ANOVA- *analysis of variance*) and the multiple linear regression, with the aim to evaluate the influence of cutting parameters (*cutting velocity and feed*) and establish a model with the damage, superficial finishing of the hole and cutting forces developed during the process.

Finally, confirmation tests were performed to validate the foreseen results from the model.

Índice

Lista de Acrónimos	xxv
Lista de Símbolos.....	xxvii
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e Motivação	1
1.2 Objectivos	4
1.3 Estrutura da Dissertação	5
2 Processo de Corte - Furação.....	7
2.1 Cinemática do Processo de Furação	8
2.2 Ferramenta de Corte de Aresta Múltipla – Broca	9
2.2.1 Broca Helicoidal.....	12
2.3 Avaliação do Processo de Furação	21
2.3.1 Processo de Corte	22
2.3.2 Ferramenta de Corte	32
2.3.3 Furo	37
2.4 Máquinas de Furação	40
2.5 Operação de Furação	42
3 Materiais Compósitos de Matriz Polimérica	45
3.1 Material Compósito - Definição	46
3.2 Constituintes do Material Compósito	47
3.2.1 Fase contínua – Matriz	47
3.2.2 Fase Descontínua – Reforço	49
3.3 Compósitos de Matriz Polimérica.....	60
4 Furação de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica	65
4.1 Parâmetros Processuais.....	67
4.2 Ferramentas de Corte	70
4.2.1 Material	70
4.2.2 Geometria de Corte	72
4.3 Avaliação da Operação de Furação nos Materiais Compósitos	75

4.3.1 – Forças de Corte	75
4.3.2 – Qualidade do Furo	86
5 Metodologia Experimental	95
5.1 Materiais Compósitos.....	95
5.2 Ferramentas de Corte.....	99
5.3 Centro de Maquinagem	101
5.4 Parâmetros Processuais	103
5.5 Avaliação do Processo de Furação	104
5.5.1 Forças de Corte	104
5.5.2 Defeitos na Peça (Dano)	114
5.5.3 Acabamento Superficial.....	118
6 Modelação Estatística - Base Experimental.....	125
6.1 Modelo Estatístico.....	125
6.1.1 Matriz Ortogonal.....	126
6.1.2 Análise de Variância (ANOVA).....	128
6.1.3 Regressão Linear Múltipla (MRA)	135
6.2 Aplicação do Modelo Estatístico.....	136
6.2.1 Matriz Ortogonal.....	137
6.2.2 Análise de Variância - ANOVA	138
6.2.3 Regressão Linear Múltipla.....	146
6.2.4 Validação do Modelo Estatístico	148
7 Resultados Obtidos e Discussão	151
7.1 Compósito Laminado Reforçado a Fibras de Carbono.....	152
7.1.1 Dano.....	152
7.1.2 Forças de Corte	159
7.2 Compósito Reforçado a Fibras de Vidro	164
7.2.1 Dano e Acabamento de Superfície.....	164
7.2.2 Forças de Corte	168
7.3 Efeito da Matriz no Compósito Reforçado a Fibras de Vidro	176
7.3.1 Dano e Acabamento de Superfície.....	176
7.3.2 Forças de Corte	181
8 Conclusões.....	187
8.1 Conclusões	187
8.2 Perspectivas de Trabalho Futuro	190
Referências	191

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Estabilizador vertical do Boeing 737 (a) e partes estruturais da Space Shuttle (b) em material compósito	2
Figura 1.2 – Defeito de Delaminação	3
Figura 2.1 – Furadora rudimentar com accionamento por arco e corda.....	7
Figura 2.2 – Cinemática do processo de furação.....	9
Figura 2.3 – Tipos de brocas utilizadas em operações de furação (a) brocas reafiáveis (b) brocas de lâmina e (c) brocas de pastilhas.....	10
Figura 2.4 – Montagem da lamina na extremidade do corpo da broca	11
Figura 2.5 – Constituição da broca helicoidal.....	12
Figura 2.6 – Broca helicoidal com haste (a) cilíndrica e (b) cónica.....	13
Figura 2.7 – Geometria de corte da broca helicoidal	15
Figura 2.8 – Efeito do ângulo de ponta nas forças de corte [<i>Stephenson and Agapiou, 1997</i>]	16
Figura 2.9 – Exemplos do tipo de geometria da ponta da broca helicoidal (a) cónica, (b) quatro facetas, (c) “Double angle” (d) “Brad” e (e) “MultiFacet”	16
Figura 2.10 – Classificação das brocas quanto ao ângulo de hélice.....	18
Figura 2.11 – Principais classes de material para ferramentas de corte	19
Figura 2.12 – Comparação dos diversos materiais para ferramentas de corte	20
Figura 2.13 – Aspectos fundamentais na avaliação do processo de furação	22
Figura 2.14 – Gráfico de velocidades de corte e rotação em função do diâmetro da broca [<i>Ruas, 1982</i>]	24
Figura 2.15 – Gráfico de avanço em função do diâmetro da broca.....	26
Figura 2.16 – Ilustração do penetramento radial (p_a) e axial (p_r) na operação de furação	27
Figura 2.17 – Forças de corte inerentes ao processo de furação	29
Figura 2.18 – Aspecto da força de avanço (F_z) e (b) binário (M_z) numa operação de furação.....	30
Figura 2.19 – Forças de corte inerentes ao processo de furação	32
Figura 2.20 – Zonas típicas de desgaste na broca helicoidal.....	33
Figura 2.21 – Definição dos valores máximos de desgaste de flanco (VB) e da cratera (KB)	35

Figura 2.22 – Determinação da vida útil da broca com recurso às forças de corte [Kalpakjian, 1995].	36
Figura 2.23 – Defeitos que ocorrem numa operação de furação	40
Figura 2.24 – Tipos de máquinas ferramentas (a) furadora sensitiva (b) furadora coluna (c) furadora radial	41
Figura 2.25 – Centro de maquinagem vertical, Mori Seiki VS 60	42
Figura 2.26 – Exemplo de algumas operações possíveis de efectuar na furadora (a) furação; (b) alargamento; (c) furação escalonada; (d) mandrilar; (e) trepanação; (f) rebaixo de perfil e (g) alargamento de perfil	43
Figura 2.27 – Geometrias resultantes da operação de furação	43
Figura 3.1 – Relação entre a tensão de rotura à tracção e o diâmetro do reforço [Chawla, 1987]...	50
Figura 3.2 – Efeito da percentagem volúmica de reforço nas propriedades mecânicas (a) tensão de rotura à tracção e (b) tensão à flexão do material compósito [Flinn and Trojan, 1995]	52
Figura 3.3 – Influência da orientação e percentagem de reforço na tensão de rotura à tracção [Kalpakjian, 1995]	53
Figura 3.4 – Classificação da orientação do reforço num material compósito (a) unidireccional (b) bidireccional e (c) multidireccional	54
Figura 3.5 – Fibra de vidro na forma de produto final	56
Figura 3.6 – Processo de fabrico das fibras de carbono	58
Figura 3.7 – Classificação dos materiais compósitos de matriz polimérica	62
Figura 3.8 – Exemplos de aplicações dos compósitos avançados na industria aeroespacial e aeronáutica (a) nave espacial X33 (b) avião comercial “Beech Starship 2000” (c) avião comercial “Boeing 757-200”	63
Figura 3.9 – Monocoque e carroçaria do McLaren F1 em material compósito reforçado a fibra de carbono	63
Figura 3.10 – (a) Monocoque do Porsche Carrera GT, (b) Tejadilho do BMW M3 CSL e (c) carroçaria do Mercedes Benz - SLR em plástico reforçado a fibra de carbono (PRFC)	64
Figura 4.1 – Geometrias de corte especiais empregues na furação de materiais compósitos (a) Taper (b) Dagger (c) Candle stick (d) Brad & Spur (e) Parabolic point (f) Brad (g) Jodrill e (h) Trepanação	73
Figura 4.2 – Avaliação da furação de materiais compósitos	75
Figura 4.3 – Influência do parâmetro processual avanço na força de avanço (F_z) de um compósito obtido por moldação manual [Khashaba, 2004]	77
Figura 4.4 – Comportamento da força de avanço (a) e binário (b) ao longo da execução de um furo utilizando uma broca helicoidal [Dharan and Won, 2000]	78
Figura 4.5 – Comportamento da força de avanço (a) e binário (b) ao longo da execução de um furo utilizando a broca especial “Tapper” [Fernandes and Cook, 2005]	79
Figura 4.6 – Influência do ângulo de ponta (σ) na (a) força de avanço e no (b) binário [Chen, 1997]	80
Figura 4.7 – Influência do ângulo de hélice (β) na (a) força de avanço e no (b) binário [Chen, 1997]	81

Figura 4.8 – Influência do avanço na (a) força de avanço e (b) binário para brocas com diferente geometria de corte num compósito reforçado a fibras de vidro [Mathew et al., 1999a].....	82
Figura 4.9 – Influência do diâmetro da broca na (a) força de avanço e (b) binário [El-Sonbaty et al., 2004]	83
Figura 4.10 – Influência da velocidade de corte na força de avanço [Khashaba, 2004].....	84
Figura 4.11 – Mecanismo de delaminação à entrada e saída do furo de um compósito laminado	87
Figura 4.12 – Influência do avanço no defeito de delaminação à saída do furo [Khashaba, 2004]	88
Figura 4.13 – Qualidade do furo à entrada (a e b) e saída (c e d) para a broca de trepanação e helicoidal respectivamente [Mathew et al., 1999a].....	89
Figura 4.14 – Geometria de corte da broca helicoidal e especial “OP” [Piquet et al., 2000]	90
Figura 4.15 – Defeito de delaminação com (a) e sem (b) placa de suporte utilizando a broca “Saw” [Tsao and Hocheng, 2005c].....	91
Figura 4.16 – Relação entre a rugosidade média aritmética (R_a) e os parâmetros processuais [Hocheng et al., 1992].....	93
Figura 4.17 – Rugosidade média aritmética em função dos parâmetros processuais [El-Sonbaty et al., 2004]	93
Figura 5.1 – Compósito laminado reforçado com 55% de fibras de carbono alternadas, 2x2, com uma orientação de 0 e 90°	96
Figura 5.2 – Compósitos reforçados com 65% de fibras de vidro (a) resina bisfenólica, ATLAC 382-05, e (b) resina ortoftálica, Viapal VUP 9731.....	98
Figura 5.3 – Ferramentas de corte de carboneto sinterizado (K10), seleccionadas para a furação dos materiais compósitos (a) Broca helicoidal “Stub Length”, (b) Broca helicoidal “Straight shank” e (c) Broca “Brad & Spur”.....	100
Figura 5.4 – Centro de maquinaria MIKRON VCE 500® utilizado nos ensaios de furação.	102
Figura 5.5 – Dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9272	105
Figura 5.6 – Princípio de funcionamento do dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9272.....	106
Figura 5.7 – Curva de calibração das três componentes da força (F_x , F_y e F_z) do dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9272 utilizado nos ensaios de furação.....	108
Figura 5.8 – Curva de calibração do binário (M_z) do dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9272 utilizado nos ensaios de furação.....	109
Figura 5.9 – Amplificador de carga de três canais, Kistler® 5019A, utilizado no sistema de medida	110
Figura 5.10 – Sistema de medida utilizado na medição e aquisição da força de avanço e binário no processo de furação (a) dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9272 (b) amplificador de carga Kistler® 5019A (c) software de aquisição de dados “Dynoware”	114
Figura 5.11 – Esquema do defeito de delaminação, entrada e saída, num compósito laminado durante a operação de furação.....	115
Figura 5.12 – Visualização do defeito de delaminação típico no compósito obtido pelo processo autoclave após a operação de furação	116
Figura 5.13 – Visualização do defeito de delaminação típico no compósito obtido pelo processo de moldação manual após a operação de furação	116

Figura 5.14 – Microscópio Óptico <i>Mitutoyo TM – 500</i> utilizado na medição do diâmetro máximo	117
Figura 5.15 – Visualização do dano, após a operação de furação, no material compósito laminado para a (a) entrada e (b) saída do furo	117
Figura 5.16 – Rugosidade média aritmética, R_a [<i>Gadelmawla et al., 2002</i>].....	119
Figura 5.17 – Amplitude máxima do perfil de rugosidade R_t [<i>Gadelmawla et al., 2002</i>]	120
Figura 5.18 – Rugosímetro de agulha <i>HommelTester - T1000</i> utilizado na caracterização das superfícies.....	121
Figura 6.1 – Gráfico linear relativo à matriz $L_9 (3^4)$ [<i>Taguchi, 1993</i>].....	127
Figura 7.1 – Efeito do avanço no dano à entrada do furo para uma velocidade constante de 40m/min e avanços de (a) 0.05mm/rot e (b) 0.2mm/rot.	152
Figura 7.2 – Influência do efeito à (a) entrada e (b) saída do furo no dano para o compósito laminado reforçado a fibras de carbono utilizando uma velocidade de corte de 40m/min e um avanço de 0.2mm/rot.	153
Figura 7.3 – Efeito da geometria de corte da broca (a) helicoidal “ <i>Straight Shank</i> ” e (b) especial “ <i>Brad & Spur</i> ” no dano à entrada do furo para uma velocidade de corte de 40m/min e um avanço de 0.05mm/rot.	153
Figura 7.4 – Evolução do factor de delaminação à entrada do furo em função do avanço para diferentes velocidades de corte.....	156
Figura 7.5 – Evolução do factor de delaminação à saída do furo em função do avanço para diferentes velocidades de corte.....	156
Figura 7.6 – Evolução do factor de delaminação à entrada e saída do furo em função do avanço para a broca helicoidal “ <i>Straight Shank</i> ”.....	158
Figura 7.7 – Evolução do factor de delaminação à entrada e saída do furo em função do avanço para a broca especial “ <i>Brad & Spur</i> ”	158
Figura 7.8 – Evolução da força de avanço (F_z) em função do avanço para diferentes velocidades de corte.....	161
Figura 7.9 – Evolução da força específica de corte (K_s) em função do avanço para diferentes velocidades de corte	161
Figura 7.10 – Evolução do factor de delaminação à entrada do furo ($F_{d \text{ entrada}}$) em função da força de avanço.....	163
Figura 7.11 – Evolução do factor de delaminação à entrada do furo ($F_{d \text{ entrada}}$) em função da força específica de corte	163
Figura 7.12 – Efeito do avanço no defeito de delaminação à entrada do furo para uma velocidade de corte constante de 71m/min e avanços de (a) $a = 0.05\text{mm/rot}$ e (b) $a = 0.2\text{mm/rot}$ utilizando a broca “ <i>Stub Length</i> ”	164
Figura 7.13 – Efeito da geometria da broca no dano à entrada do furo (a) Broca “ <i>Stub Length</i> ” (b) Broca “ <i>Brad & Spur</i> ” utilizando uma velocidade de corte de 71m/min e um avanço de 0.2mm/rot	165
Figura 7.14 – Evolução do factor de delaminação à entrada do furo, em função do avanço, para diferentes velocidades de corte.....	167
Figura 7.15 – Evolução da rugosidade média aritmética do furo, em função do avanço, para diferentes velocidades de corte.....	167

Figura 7.16 – Efeito do avanço nas forças de corte para broca “ <i>Stub Length</i> ” utilizando uma velocidade de corte constante de 71m/min e avanços de (a) $a = 0.05\text{mm/rot}$ e (b) $a = 0.2\text{mm/rot}$	169
Figura 7.17 – Efeito da geometria de corte (a) broca helicoidal “ <i>Stub Length</i> ” e (b) broca especial “ <i>Brad & Spur</i> ”, nas forças de corte, para as mesmas condições de corte	171
Figura 7.18 – Evolução da força de avanço, em função do avanço, para diferentes velocidades de corte	173
Figura 7.19 – Evolução da força específica de corte, em função do avanço, para diferentes velocidades de corte	173
Figura 7.20 – Evolução do factor de delaminagem à entrada ($F_{d \text{ entrada}}$) em função da força de avanço	175
Figura 7.21 – Evolução do factor de delaminagem à entrada ($F_{d \text{ entrada}}$) em função da força específica de corte	175
Figura 7.22 – Efeito da matriz (a) ortoftálica <i>Viapal Vup 9731</i> e (b) bisfenólica <i>ATLAC 382-05</i> no dano à entrada do furo para uma velocidade de corte de 71m/min e avanço de 0.2mm/rot	177
Figura 7.23 – Evolução do factor de delaminagem à entrada do furo em função do avanço para diferentes velocidades de corte	179
Figura 7.24 – Evolução da rugosidade média aritmética do furo em função do avanço para diferentes velocidades de corte	180
Figura 7.25 – Evolução da amplitude máxima de perfil de rugosidade do furo em função do avanço para diferentes velocidades de corte	180
Figura 7.26 – Efeito da matriz (a) ortoftálica – <i>Viapal Vup 9731</i> e (b) bisfenólica – <i>ATLAC 382-05</i> , nas forças de corte para uma velocidade de corte de 71m/min e um avanço de 0.2mm/rot	182
Figura 7.27 – Evolução da força de avanço em função do avanço para ambos os materiais compósitos	184
Figura 7.28 – Evolução da força específica de corte em função do avanço para ambos os materiais compósitos	184
Figura 7.29 – Evolução da potencia de corte em função do avanço para diferentes velocidades de corte	185

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Geometria de corte em função do material a maquinar [Kalpakjian, 1995;Stephenson and Agapiou, 1997]	17
Tabela 2.2 – Parâmetros processuais (V_c e a) recomendados para brocas helicoidais de aço rápido (HSS) [Kalpakjian, 1995;Shaw, 1997]	25
Tabela 2.3 – Valores do avanço em função do diâmetro da broca [Edwards, 1993;Groover, 1996]	25
Tabela 2.4 – Métodos para reduzir o desgaste que ocorre na broca helicoidal [Stephenson and Agapiou, 1997]	34
Tabela 2.5 – Valores de desgaste de flanco e de cratera máximos recomendados.....	35
Tabela 2.6 – Tolerâncias obtidas na operação de furação e mandrilagem	39
Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas das principais matrizes termoendurecíveis.....	49
Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas e térmicas dos principais materiais de reforço.	51
Tabela 3.3 – Composição química das classes de fibras de vidro utilizadas nos materiais compósitos poliméricos	55
Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas das fibras de vidro utilizadas nos materiais compósitos poliméricos	56
Tabela 3.5 – Propriedades mecânicas das fibras de carbono utilizadas nos materiais compósitos poliméricos	59
Tabela 3.6 – Propriedades mecânicas das fibras de aramida, Kevlar 29® e Kevlar 49®	60
Tabela 3.7 – Propriedades mecânicas dos principais compósitos de matriz polimérica	61
Tabela 4.1 – Parâmetros processuais (V_c e a) empregues na furação de materiais compósitos	70
Tabela 5.1 – Propriedades mecânicas e térmicas do compósito laminado reforçado com 55% de fibras de carbono [INEGI®].....	97
Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas e térmicas dos materiais compósitos de matriz polyester reforçados com 65% de fibras de vidro [Vidropol®]	99
Tabela 5.3 – Propriedades físicas, mecânicas e térmicas do carboneto sinterizado (WC-Co) utilizado nos ensaios	100
Tabela 5.4 – Características principais do Centro de Maquinagem “MIKRON VCE 500 ”.....	103
Tabela 5.5 – Parâmetros processuais utilizados nos ensaios de furação dos materiais compósitos.....	104

Tabela 5.6 – Principais características do dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9272 utilizado nos ensaios	107
Tabela 5.7 – Principais características do amplificador de carga Kistler® 5019A utilizado no sistema de medida	112
Tabela 5.8 – Parâmetros de calibração (dinamómetro e amplificador de sinal) utilizados para a aquisição da força de avanço e binário na furação de materiais compósitos.....	114
Tabela 5.9 – Principais características do rugosímetro de agulha, <i>HommelTester - T1000</i>	122
Tabela 6.1 – Matriz ortogonal $L_9(3^4)$ [Taguchi, 1993].	127
Tabela 6.2 – Matriz ortogonal $L_9(3^4)$ utilizada no planeamento experimental	128
Tabela 6.3 – Tabela da análise de variância ANOVA.....	129
Tabela 6.4 – Tabela do Teste F para um nível de confiança de 95% [Guimaraes and Cabral, 1997]	133
Tabela 6.5 – Resultados obtidos para o material compósito laminado reforçado a fibras de carbono.	137
Tabela 6.6 – Resultados obtidos para o material compósito reforçado a fibras de vidro, Viapal VUP 9731.	138
Tabela 6.7 – Atribuição dos níveis a cada um dos factores para o material compósito reforçado a fibras de carbono.	139
Tabela 6.8 – Atribuição dos níveis a cada um dos factores para o material compósito reforçado a fibras de vidro, Viapal VUP 9731.	139
Tabela 6.9 – Resultados obtidos da análise ANOVA para o factor de delaminação à entrada ($F_{d\text{ entrada}}$) relativo à operação de furação no material compósito laminado reforçado a fibras de carbono.	140
Tabela 6.10 – Resultados obtidos da análise ANOVA para o factor de delaminação à saída ($F_{d\text{ saída}}$) relativa à operação de furação no material compósito laminado reforçado a fibras de carbono....	141
Tabela 6.11 – Resultados obtidos da análise ANOVA para a força de avanço (F_z) relativa à operação de furação no material compósito laminado reforçado a fibras de carbono.....	142
Tabela 6.12 – Resultados obtidos da análise ANOVA para a força específica de corte (K_s) relativa à operação de furação no material compósito laminado reforçado a fibras de carbono.....	142
Tabela 6.13 – Resultados obtidos da análise ANOVA para o factor de delaminação à entrada ($F_{d\text{ entrada}}$) relativa à operação de furação no material compósito reforçado a fibras de vidro Viapal Vup 9731	143
Tabela 6.14 – Resultados obtidos da análise ANOVA para a rugosidade média aritmética (R_a) relativa à operação de furação no material compósito reforçado a fibras de vidro Viapal Vup 9731	144
Tabela 6.15 – Resultados obtidos da análise ANOVA para a força de avanço (F_z) relativa à operação de furação no material compósito reforçado a fibras de vidro Viapal Vup 9731	145
Tabela 6.16 – Resultados obtidos da análise ANOVA para a força específica de corte (K_s) relativa à operação de furação no material compósito reforçado a fibras de vidro Viapal Vup 9731	146
Tabela 6.17 – Parâmetros processuais utilizados nos ensaios de confirmação para o material compósito Viapal Vup 9731.....	148

Tabela 6.18 – Resultados dos ensaios de confirmação e sua comparação com os resultados obtidos pelos modelos para o material compósito Viapal Vup 9731 relativos à broca helicoidal “ <i>Stub Length</i> ”	149
Tabela 6.19 – Resultados dos ensaios de confirmação e sua comparação com os resultados obtidos pelos modelos para o material compósito Viapal Vup 9731 relativo à broca especial “ <i>Brad & Spur</i> ”	149
Tabela 7.1 – Resultados obtidos para o factor de delaminação (F_d) à entrada e saída do furo, em função dos parâmetros processuais, para ambas as ferramentas e corte	155
Tabela 7.2 – Resultados obtidos para a força de avanço (F_z) e força específica de corte (K_s), em função dos parâmetros processuais, para ambas as ferramentas de corte	160
Tabela 7.3 – Resultados obtidos para o factor de delaminação (F_d) à entrada do furo e rugosidade média aritmética (R_a), em função dos parâmetros processuais, para ambas as brocas.....	166
Tabela 7.4 – Resultados obtidos para a força de avanço e força específica de corte, em função dos parâmetros processuais, para ambas as ferramentas e corte.....	172
Tabela 7.5 – Resultados obtidos para o factor de delaminação ($F_{d \text{ entrada}}$) à entrada do furo, rugosidade média aritmética (R_a) e amplitude máxima do perfil de rugosidade (R_t) para ambos os compósitos.....	178
Tabela 7.6 – Resultados obtidos para a força de avanço, força específica de corte e potência de corte, para ambos os compósitos.....	183

Lista de Acrónimos

ANOVA	Analysis of Variance
CBN	Cubic Boron Nitride
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastics
CNC	Computer Numerical Control
CMM	Compósitos de Matriz Metálica
C-Scan	Inspecção ultra sónica com varrimento
CVD	Chemical Vapour Deposition
DIN	Deutsches Institut für Norming
GFRP	Glass Fiber Reinforced Plastics
INEGI	Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
ISO	International Organization for Standardization
LTM	Laboratório de Tecnologia Mecânica
MRA	Multiple Regression Analysis
PCBN	Polycrystalline Cubic Boron Nitride
PCD	Polycrystalline Diamond
PRF	Plásticos Reforçados com Fibras
PRFV	Plásticos Reforçados com Fibra de Vidro
PAN	Polyacrylonitrile
HSS	High Speed Steel
TAC	Tomografia Axial Computorizada

Lista de Símbolos

a	Avanço
a_e	Espessura da apara
a_l	Largura da apara
A	Factor em estudo
A₁, A₂, A₃	Nível 1, 2 e 3 do factor A
A_i	Somatório das observações no nível A _i
$\overline{A_i}$	Média das observações sob o nível A _i (A _i /n _{Ai})
a_p	Profundidade de corte
a_z	Avanço por aresta de corte
Al₂O₃	Alumina
B	Factor em estudo
Co	Cobalto
C₁ ; C₂	Constantes empíricas
D	Diâmetro da broca
D_{AVG}	Área nominal do furo
D_{furo}	Diâmetro nominal do furo
D_{max}	Diâmetro máximo do dano
DQM	Desvio Quadrático Médio ou Variância
D_{MAR}	Área delaminada
D_{RAT}	Rácio do dano
Teste F	Teste Fundamental da ANOVA
E_n	Erro aleatório associado ao valor observado Y _n
F_c	Força de corte
F_d	Factor de delaminagem

F_r	Força radial
F_z	Força de avanço
gl	Graus de liberdade
HB	Dureza Brinell
HM	Elevado módulo de elasticidade
KB	Desgaste na cratera
K_A	Número de níveis do factor A
k_r	Ângulo da aresta de corte
K_s	Força específica de corte
L	Comprimento de base
L₉ (3⁴)	Matriz ortogonal de nove ensaios com três níveis e quatro colunas
L_m	Comprimento de medida
LM	Baixo módulo de elasticidade
L_t	Comprimento de palpagem
M_z	Binário
n	Número de rotações
<i>n</i>	Índice das observações das variáveis X_1, \dots, X_j e Y
n_{Ai}	Número de observações no nível A _i
N	Número de furos
N	Número total de observações
p	Penetramento
p_a	Penetramento axial
p_r	Penetramento radial
P	Percentagem de contribuição
P_c	Potência de corte
R	Coefficiente de correlação múltipla
R_a	Rugosidade média aritmética
R_{at}	Rugosidade média aritmética teórica
r_e	Raio de canto
R_t	Amplitude máxima do perfil de rugosidade
S_a	Secção da apara
Si₃N₄	Nitreto de silício
SQ	Soma dos quadrados das variações parciais

T	Vida útil da ferramenta
T_o	Soma de todas as observações
\bar{T}_o	Média de todas as observações ou média global (T/N)
TiC	Carboneto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
V_a	Velocidade de avanço
VB	Desgaste na aresta de corte ou flanco
V_c	Velocidade de corte
V_e	Velocidade de corte efectiva
WC	Carboneto Tungsténio
WC-Co	Carboneto Tungsténio sinterizado
x	Constante empírica
X_j	Variável quantitativa independente
\bar{X}_j	Média aritmética das observações da variável X _j
X_{1n}, X_{jn}, Y_n	N-ésima observação das variáveis X ₁ , X _j e Y
y	Observação (resultado)
Y	Variável quantitativa dependente
y_i	I-ésima observação
z	Número de arestas de corte
α	Ângulo de saída ou folga
α	Nível de significância
β	Ângulo de gume /hélice
α, β₁, β_j	Parâmetros fixos a estimar da relação linear entre X ₁ ,...X _j e Y
ε	Ângulo de canto
φ	Diâmetro da broca
γ	Ângulo de ataque
σ	Ângulo de ponta
σ²	Variância
ω	Velocidade angular
Ψ	Ângulo de gume transversal

Introdução

Os materiais compósitos de matriz polimérica, normalmente designados por plásticos reforçados com fibras (PRF), são materiais caracterizados por uma elevada resistência mecânica, rigidez e baixa densidade. Devido às excelentes propriedades que possuem, estes apresentam melhor desempenho em algumas aplicações que os materiais metálicos, no entanto, eles podem facilmente ser danificados durante a sua maquinagem, a menos que o processo seja executado com parâmetros processuais e ferramentas de corte adequadas. O dano típico sofrido pelos materiais compósitos, durante o processo de corte, denomina-se delaminagem.

1.1 Enquadramento e Motivação

Os materiais compósitos de matriz polimérica começaram a ser utilizados na indústria aeroespacial a partir dos meados do século XX, e actualmente apresentam enorme interesse em diversas áreas, nomeadamente na indústria aeronáutica, automóvel, marítima, construção civil, em virtude das excelentes propriedades que possuem [Chawla, 1987; Groover, 1996]:

- ☐ elevado rácio resistência/peso;
- ☐ elevado rácio módulo de elasticidade/peso
- ☐ baixa densidade
- ☐ boa resistência à fadiga

- ❑ boa resistência à corrosão
- ❑ baixa expansão térmica conduzindo a boa estabilidade dimensional

Os compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro ou de carbono são materiais de aplicação crescente, quer no reforço de estruturas já existentes, quer em novas estruturas. A utilização destes materiais em componentes estruturais tem permitido uma redução significativa de peso e uma melhoria das suas características dinâmicas no qual têm vindo a substituir, de forma contínua e crescente, os materiais metálicos “convencionais”. A título de exemplo, a substituição do alumínio por compósitos poliméricos estruturais, permite uma redução de peso de 20 a 30%, além de 25% na redução do custo final de obtenção das peças [Mallick, 1993; Alting, 1994; Flinn and Trojan, 1995; Groover, 1996; Shackelford, 2000]. A indústria aeroespacial e aeronáutica, têm apostado fortemente na utilização destes materiais em componentes estruturais com junção mecânica, conforme se observa na Figura 1.1.

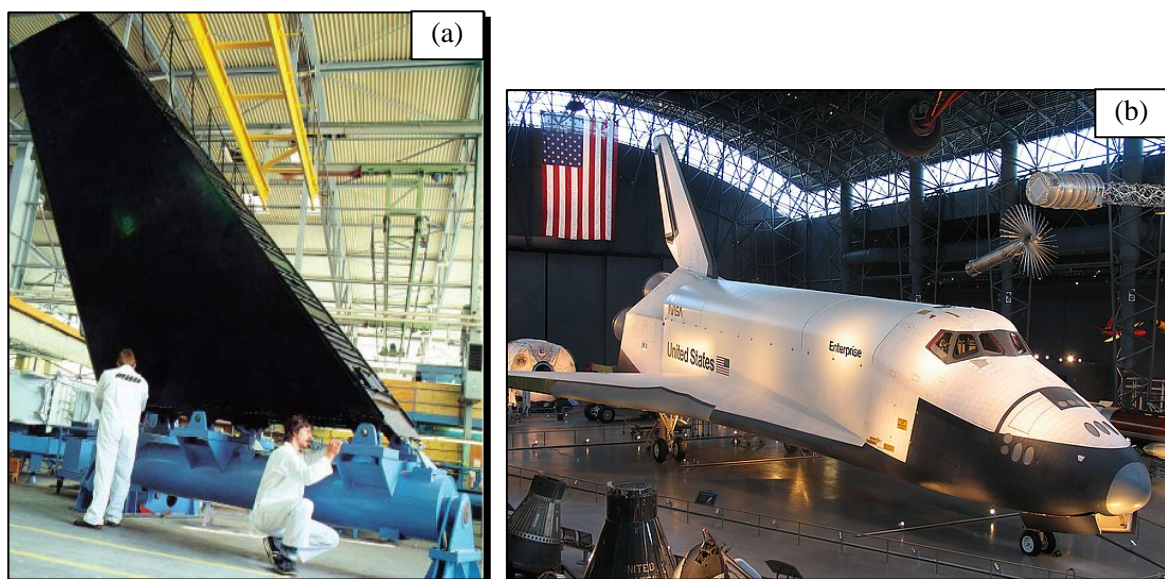


Figura 1.1 – Estabilizador vertical do Boeing 737 (a) e partes estruturais da Space Shuttle (b) em material compósito ¹

No entanto, o comportamento mecânico e a qualidade dos componentes em material compósito dependem dos processos de fabrico e da sua maquinagem. Os componentes

¹ www.boeing.com; www.nasa.com

estruturais devem possuir furos de boa qualidade dado que a eficiência da ligação mecânica é fortemente dependente da qualidade do furo, dado que 60% dos componentes são rejeitados face aos defeitos existentes no material compósito [Stone and Krishnamurthy, 1996; Linbo et al., 2003].

A vasta aplicação de materiais compósitos em componentes estruturais conduz impreterivelmente ao processo de furação de forma a permitir a montagem dos diversos componentes. No entanto, a execução de furos em materiais compósitos requer um cuidado especial devido à sua heterogeneidade e anisotropia, no qual induz a defeitos específicos (*defeito de delaminagem*), Figura 1.2, reflectindo-se de uma forma directa na resistência do material quer a solicitações estáticas quer dinâmicas (fadiga) [Adams, 1996; Persson et al., 1997a; Persson et al., 1997b; Lachaud et al., 2001; Velayudham et al., 2005].



Figura 1.2 – Defeito de Delaminagem

A delaminagem é o defeito mais preocupante visto que, para além de conduzir a uma deficiente montagem dos componentes, conduz a uma diminuição da resistência do material induzindo uma variação do comportamento dinâmico de toda a estrutura associada ao furo, podendo originar o colapso prematuro das estruturas em serviço [Koenig et al., 1985; Hocheng and Puw, 1992; Persson et al., 1997a; Persson et al., 1997b; Xu et al., 2004].

Face ao elevado número de rejeições promovido pelo defeito de delaminação, a investigação em torno deste assunto tem sido um tópico vastamente estudado ao longo dos últimos anos. Diversos investigadores, [Koenig *et al.*, 1985; Tagliaferri *et al.*, 1990; Komanduri *et al.*, 1991; Hocheng and Puw, 1992, 1993; Ho-Cheng *et al.*, 1993; Jain and Yang, 1993, 1994; Lin and Chen, 1996; Mathew *et al.*, 1999a, 1999b; Capello and Tagliaferri, 2001; Ramkumar *et al.*, 2001; Brinksmeier and Janssen, 2002; Won and Dharan, 2002a; Tsao and Hocheng, 2003; Bhatnagar *et al.*, 2004b], dedicaram-se ao estudo da furação de materiais compósitos poliméricos verificando que o aparecimento do defeito de delaminação ocorre em função dos parâmetros processuais e da geometria da ferramenta empregue. Desta forma, assiste-se actualmente a alterações na geometria das ferramentas de corte, assim como à optimização dos parâmetros processuais com o intuito de obter bons resultados ao nível do acabamento de superfície e precisão dimensional, no qual o recurso a ferramentas especiais é determinante para a minimização do defeito de delaminação. Assim sendo e, em consonância com recentes desenvolvimentos, pretende-se neste trabalho utilizar uma nova geometria de corte com o objectivo de minimizar o defeito de delaminação nos materiais compósitos.

1.2 Objectivos

O objectivo principal deste trabalho consiste em avaliar o comportamento da furação de materiais compósitos de matriz polimérica obtidos por processos de fabrico distintos, *autoclave e moldação manual*, com vista a compreender e minimizar o problema típico (*defeito de delaminação*) induzido pela ferramenta durante o processo de corte. A avaliação é efectuada ao nível do processo de corte (*forças e potência de corte*) e da qualidade de superfície (*acabamento e defeito de delaminação*) obtida no furo.

No sentido de contribuir para a furação de materiais compósitos poliméricos com o mínimo ou isenção de defeitos, esta dissertação teve como objectivo principal a avaliação da influência dos parâmetros processuais e da geometria da ferramenta de corte na qualidade dos furos. Para tal, foi introduzida uma ferramenta de corte especial, recentemente disponível no mercado, denominada “*Brad & Spur*” e comparado o seu desempenho com uma ferramenta de corte convencional (*geometria helicoidal*). Aplicou-se também um modelo estatístico baseado na metodologia de Taguchi, com o objectivo de

prever o comportamento da furação avaliando a influência dos parâmetros processuais (V_c e a) no processo de corte (*força de avanço, força específica de corte e potência de corte*), no acabamento de superfície e na delaminação dos furos.

Desta forma, os objectivos deste trabalho foram divididos em três fases distintas. *Numa primeira fase* efectuou-se a avaliação da furação de diferentes materiais compósitos ao nível do processo de corte (*forças de avanço e binário*) e da qualidade de superfície obtida (*delaminação e acabamento de superfície*) com recurso a ferramentas de corte com diferente geometria (*convencional e especial*) com a finalidade de avaliar e seleccionar a ferramenta de corte com melhor desempenho.

Numa segunda fase pretendeu-se avaliar a influência da matriz termoendurecível, *bisfenólica - ATLAC 382-05 e ortoftálica - Viapal VUP 9731*, vastamente utilizadas no fabrico do compósito reforçado a fibras de vidro, utilizando a ferramenta de corte que melhor desempenho apresentou no estudo anterior.

Numa terceira fase aplicou-se um modelo estatístico, com base na metodologia de Taguchi, com vista a prever o comportamento da furação dos materiais compósitos.

Fundamentalmente, procurou-se estudar os benefícios da utilização de brocas especiais e de modelos estatísticos com vista a minimizar o defeito de delaminação e a maximizar o acabamento de superfície na parede do furo.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em capítulos incluindo a ***Introdução***, que descreve o enquadramento e motivação do trabalho realizado face à necessidade industrial, e os seus principais objectivos.

No ***Capítulo 2 – Processo de Corte - Furação***, apresentam-se os aspectos fundamentais da operação de furação abordando a cinemática do processo, a ferramenta de corte de aresta múltipla, os parâmetros avaliadores do processo e máquinas de furação. Apresentam-se ainda os factores que influenciam directamente e indirectamente a operação de furação.

No ***Capítulo 3 - Materiais Compósitos de Matriz Polimérica***, apresentam-se algumas considerações e generalidades sobre os materiais compósitos de matriz polimérica termoendurecível. Descrevem-se, sucintamente, os constituintes do material compósito

(*Fase contínua - Matriz e Fase Descontínua - Reforço*), bem como as suas propriedades mecânicas e térmicas. Por fim, apresentam-se algumas propriedades e principais aplicações dos materiais compósitos de matriz polimérica.

No **Capítulo 4 – Furação de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica**, apresentam-se os aspectos fundamentais relativos à furação de materiais compósitos, abordando os parâmetros processuais (*velocidade de corte e avanço*), ferramentas de corte (*material e geometria*) e os parâmetros avaliadores (*forças de corte, defeitos e acabamento de superfície*).

No **Capítulo 5 – Metodologia Experimental**, descreve-se a metodologia utilizada na realização dos ensaios, detalhando aspectos relativos aos materiais compósitos, ferramentas de corte e equipamentos utilizados. Descreve-se ainda as técnicas de caracterização que permitiram avaliar a furação dos materiais compósitos.

No **Capítulo 6 – Modelação Estatística - Base Experimental**, descreve-se, pormenorizadamente, o modelo estatístico aplicado, com base na metodologia de Taguchi e na análise de variância (*ANOVA - Analysis of Variance*). Efectua-se a análise e discussão dos resultados obtidos em função do material compósito e correlacionam-se os diversos factores envolvidos utilizando a técnica estatística regressão linear múltipla. Por fim, efectua-se a validação do modelo estatístico.

No **Capítulo 7 – Resultados Obtidos e sua Discussão** efectua-se a análise e discussão resultados obtidos em duas secções, de acordo com os objectivos propostos:

- Avaliar a furação de diferentes materiais compósitos ao nível do processo de corte (*forças de avanço e binário*) e da qualidade de superfície obtida (*defeito de delaminação e acabamento de superfície*) com recurso a ferramentas de corte de carbonetos sinterizados (K10) com diferente geometria (convencional e especial).
- Avaliar a influência da matriz termoendurecível, *bisfenólica - ATLAC 382-05 e ortoftálica - Viapal VUP 9731*, utilizada no fabrico do compósito reforçado a fibras de vidro, ao nível do processo de corte e qualidade de superfície obtida.

No **Capítulo 8 – Conclusões** apresentam-se, de um modo geral, as principais conclusões deste trabalho. Apresentam-se igualmente perspectivas de desenvolvimento futuro no seguimento dos assuntos apresentados.

Capítulo 2

Processo de Corte - Furação

O processo de furação é uma das operações de maquinagem mais importante e, vastamente, utilizada pelas diversas indústrias, dado que a maior parte das peças ou componentes de construção mecânica apresentam furos. Esta operação é um dos processos mais antigos utilizado pelo homem. Na Figura 2.1, podemos observar uma furadora rudimentar que utiliza sílex e ossos como ferramentas, e que depende exclusivamente da habilidade do operador. Também existem registos que indicam que a furação foi uma das primeiras operações a ser executada em metal. Ao longo dos anos, a furação manteve a sua importância dentro dos processos de maquinagem, sendo actualmente fundamental nos processos industriais.

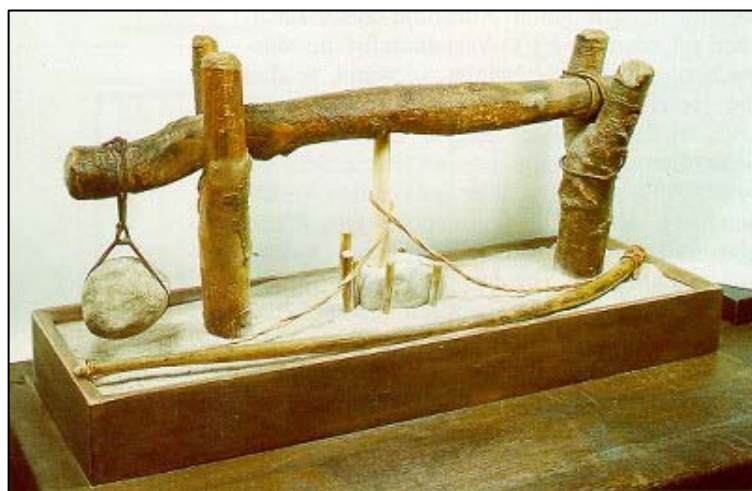


Figura 2.1 – Furadora rudimentar com accionamento por arco e corda².

² www.lmp.ufsc.br/linhas_de_pesquisa/dueco

Efectuando uma análise dos diversos componentes mecânicos actuais constata-se que a maioria apresenta furos. A título de exemplo, verifica-se que a fuselagem de um avião comercial possui uma grande quantidade de furos, em que estes servem para a montagem de diversos componentes por intermédio de parafusos e rebites [Kalpakjian, 1995].

2.1 Cinemática do Processo de Furação

O processo de furação realiza-se por intermédio do corte por arrancamento da apara, removendo todo o material compreendido no volume do furo sob forma de apara helicoidal, com auxílio de uma ferramenta de aresta múltipla, designada por broca. Esta operação é conseguida com a execução de dois movimentos simultâneos conforme se pode observar na Figura 2.2: um *movimento de rotação*, que constitui o movimento principal ou de corte e um *movimento de translação* que constitui o movimento de avanço/penetramento axial de aproximação da ferramenta à peça. A broca é munida de um movimento de rotação (*movimento de corte*) conjuntamente com um movimento rectilíneo (*translação*) segundo o seu eixo (*movimento de avanço*). O movimento principal avalia-se pela velocidade de corte, considerada pelo seu valor máximo, que se verifica no ponto da periferia do gume da broca, o qual diminui da periferia para o eixo da broca [Boothroyd and Knight, 1989; Edwards, 1993; Shaw, 1997]. Esta velocidade exprime-se em m/min e é calculada através da velocidade de rotação da broca e do diâmetro, pela seguinte expressão:

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \quad (2.1)$$

sendo, D o diâmetro da broca em [mm] e n o número de rotações da broca por minuto.

A combinação dos movimentos em simultâneo, *o de corte e o de avanço*, origina por parte da ferramenta à formação de uma apara contínua ou descontínua. O movimento de avanço/penetramento axial, o qual determina a espessura da apara, exprime-se em mm/rot. Este movimento pode também ser realizado pela peça contra a ferramenta animada de movimento de rotação [Boothroyd and Knight, 1989; Shaw, 1997].

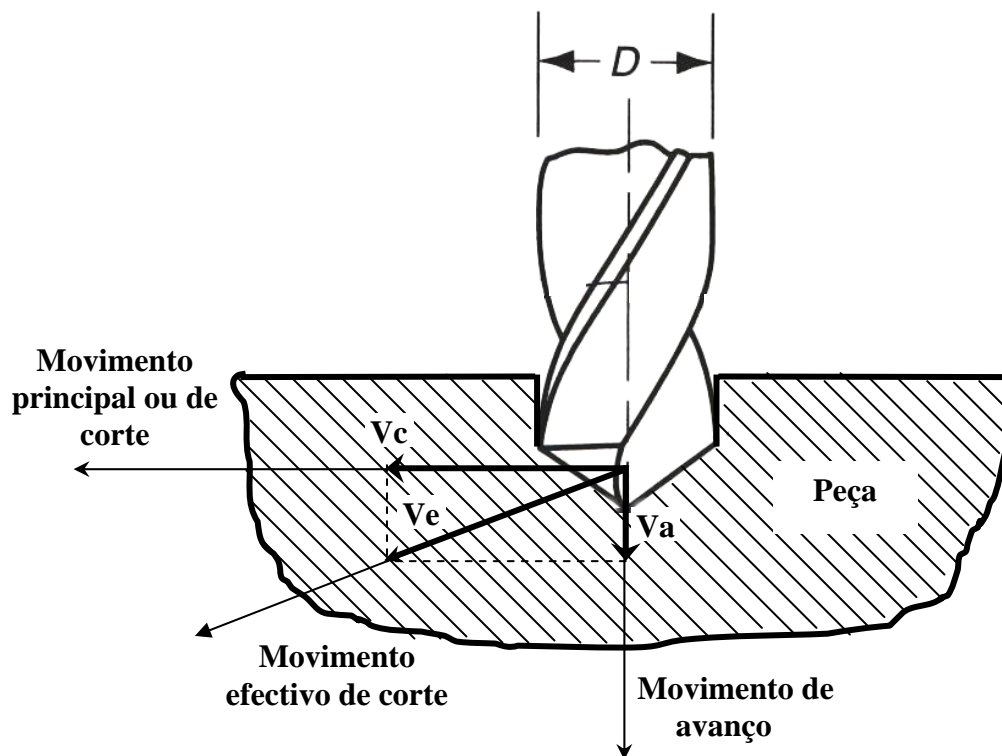


Figura 2.2 – Cinemática do processo de furação

2.2 Ferramenta de Corte de Aresta Múltipla – Broca

A broca é uma ferramenta de corte que possui uma ou mais arestas de corte (*navalhas*) helicoidais ou rectas, cavidades ou canais no corpo da broca que permitem a extracção do material removido (*apara*) ou a passagem do fluído de corte durante a formação do furo no material. A broca para além de variar na sua forma, dimensão e tolerância é classificada em função do seu material, do seu comprimento, geometria de corte, número de arestas de corte e tipo de haste ou cabo [Stephenson and Agapiou, 1997].

A escolha adequada de uma broca para determinada aplicação, passa por diversos factores, sendo eles, o material a maquinar, geometria de corte, material da broca, dimensão do furo, tipo de furo (*cego ou passante*), características da entrada e saída da broca na peça a furar, qualidade do furo desejada, características da máquina e sistema de aperto, utilização de fluído de corte e pelos parâmetros processuais (*velocidade de corte e avanço*). Apesar dos diversos fabricantes (*Titex Plus® – Precision Cutting Tools; Sandvik Coromant®; Kennametal® - Manufacturer of cutting tools and tooling systems; Guhring®; M.A. Ford*

– *High Performance Cutting Tools*) apresentarem produtos muito similares entre si, estes apresentam pequenas diferenças, as quais influenciam fortemente a vida útil da ferramenta e qualidade do furo, especialmente para brocas de pequeno diâmetro ($< 4\text{mm}$) [Stephenson and Agapiou, 1997].

De um modo geral, podemos encontrar três tipos de brocas utilizadas em operações de furação, as brocas reafiáveis, as brocas de lâmina e as brocas de pastilhas conforme se observa na Figura 2.3 [Edwards, 1993; Shaw, 1997; Stephenson and Agapiou, 1997].

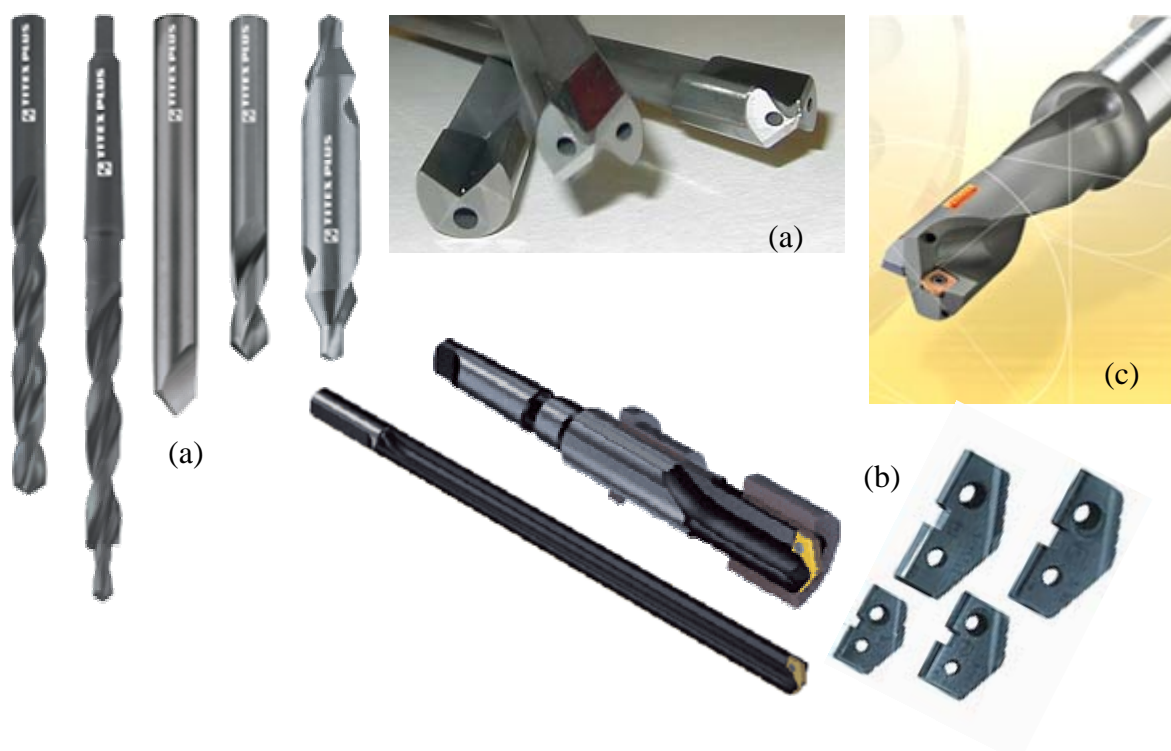


Figura 2.3 – Tipos de brocas utilizadas em operações de furação (a) brocas reafiáveis³ (b) brocas de lâmina⁴ e (c) brocas de pastilhas⁵

A broca de lâmina é constituída por uma lâmina movível formada por duas arestas de corte, em que esta se encontra montada na extremidade do corpo da broca, conforme se observa nas Figuras 2.3 e 2.4. Esta ferramenta apresenta ângulos de ponta (σ) superiores a 140° e as arestas de corte estendem-se até um diâmetro superior ao diâmetro do cabo. As suas faces de ataque apresentam uma curvatura, promovendo assim, o enrolamento das aparas. Dado que as lâminas de corte são fabricadas em aço rápido, estas brocas não

³ www.titex.com - Titex Plus® – Precision Cutting Tools; www.drillmasters.com

⁴ www.alliedmachine.com

⁵ www.coromant.sandvik.com - Sandvik Coromant®

admitem velocidades de corte muito elevadas. No entanto, permitem avanços severos (1.5 a 5 vezes aos utilizados com as brocas helicoidais). A utilização destes avanços passa pelo recurso de máquinas muito potentes, robustas e com avanços mecânicos. Tradicionalmente, estas brocas são utilizadas para executar furos com diâmetros superiores a 25mm, no entanto, já existem brocas de lâmina com diâmetros inferiores, 9mm. De um modo geral, esta broca apresenta como grande vantagem a ampla gama de materiais (*aço rápido, carboneto de tungstênio, cermets, cerâmicos, diamante policristalino e nitreto de boro cúbico policristalino*) a utilizar no fabrico da lâmina, relativamente às brocas reafiáveis [Stephenson and Agapiou, 1997].

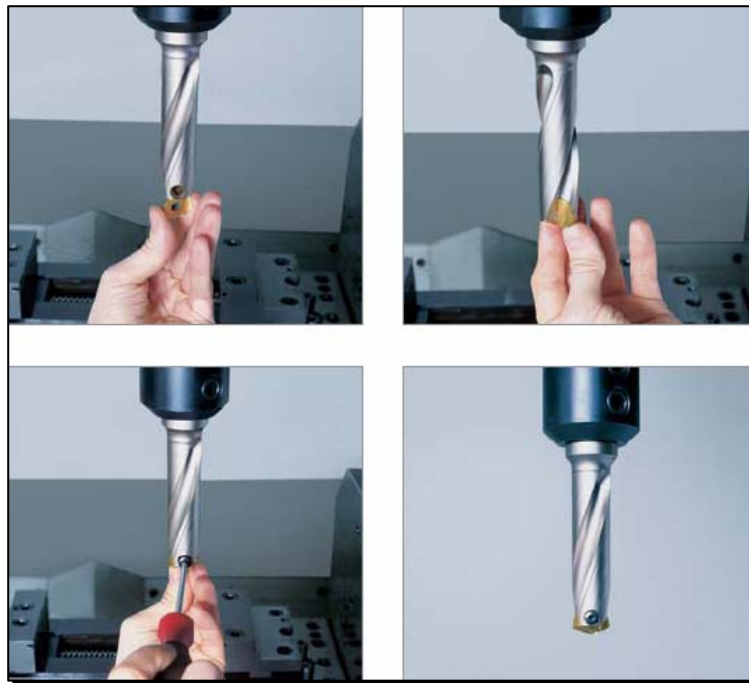


Figura 2.4 – Montagem da lamina na extremidade do corpo da broca⁶

A broca de pastilhas é constituída por um cabo cilíndrico ou cónico, um corpo com duas ranhuras direitas ou helicoidais, sendo colocado na extremidade deste, 2 ou 3 pastilhas de carbonetos sinterizados (*metal duro*) em função do seu diâmetro. Estas brocas apresentam um ângulo de ponta compreendido entre 170 e 200°. Tal como na broca de lâmina, esta também apresenta um furo axial para condução do fluido de corte até às arestas de corte. Com estas ferramentas conseguem-se executar furos com diâmetros desde os 18.5 aos 56mm, sendo possível a utilização de elevadas velocidades de corte e avanços. As arestas

⁶ www.titex.com - Titex Plus® – Precision Cutting Tools

de corte podem ser renovadas sem que para isso a ferramenta tenha que ser desmontada da máquina. A profundidade de furação é limitada a 2 ou 3 vezes o diâmetro [Stephenson and Agapiou, 1997]. De acordo com a Figura 2.3, as brocas reafiáveis apresentam diversos tipos, entre eles, a broca helicoidal, broca escalonada, broca de pontear, broca de ponto e broca canhão, sendo a broca helicoidal a mais conhecida entre elas [Watson, 1985]. A abordagem de todos os tipos de brocas reafiáveis está muito para além do pretendido para esta dissertação, portanto, a partir deste ponto, focar-se-ão apenas as brocas helicoidais, dado que 80% da furação é executada com este tipo de broca [Edwards, 1993; Stephenson and Agapiou, 1997].

2.2.1 Broca Helicoidal

A broca helicoidal é a ferramenta de corte de aresta múltipla mais comum, hoje em dia, para efectuar trabalhos correntes de furação. A generalização do seu uso deve-se às grandes vantagens que apresentam em relação aos outros tipos de brocas, nomeadamente, elevada produtividade, robustez, facilidade da saída da apara, geometria adequada e fundamentalmente, permite um reafiamento consecutivo. De um modo geral, apresenta diâmetros compreendidos entre 0.15mm e 80mm e é constituída por um cabo ou haste, corpo e ponta (*parte activa*), conforme se observa na Figura 2.5 [Ema et al., 1988; Boothroyd and Knight, 1989; Groover, 1996].

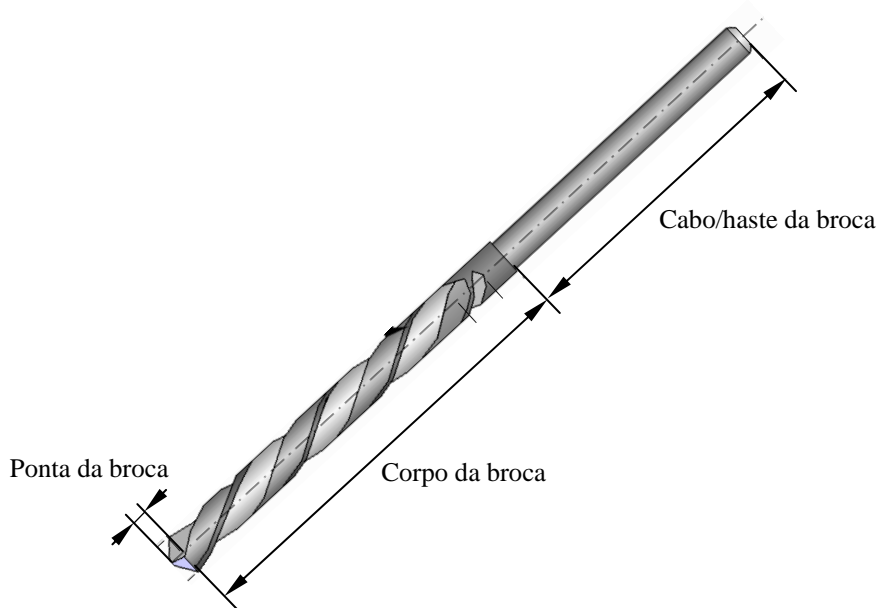


Figura 2.5 – Constituição da broca helicoidal

O cabo ou haste é a parte da broca que permite a sua fixação no porta-ferramenta da máquina, enquanto que a ponta é a parte cortante da broca, caracterizada pela geometria de corte, que exerce influência directa sobre as condições em que se realiza o corte do material [Boothroyd and Knight, 1989; Groover, 1996; Shaw, 1997; Stephenson and Agapiou, 1997].

O cabo ou haste para o encabadouro pode ser cilíndrico e cónico (Figura 2.6) para brocas de pequena dimensão ($\varnothing 12 - 16\text{mm}$), e cone *Morse* para as brocas de maior dimensão. O tipo de cabo a utilizar é extremamente importante dado que este determina a precisão e rigidez do sistema de aperto, bem como, limita a velocidade de corte e pressões de fluido de corte a utilizar. A utilização de cabos de longo comprimento propicia a uma maior concentricidade e rigidez da broca [Edwards, 1993; Stephenson and Agapiou, 1997].

De acordo com a Figura 2.5, a broca helicoidal apresenta dois canais (*ranhuras*) em hélice ao longo do corpo da broca originando duas arestas de corte que se reúnem na ponta da broca, em que cada uma remove a sua parte de material. O material removido pelas arestas de corte, usualmente designado por *apara*, é conduzido pelos canais helicoidais da broca [Edwards, 1993].

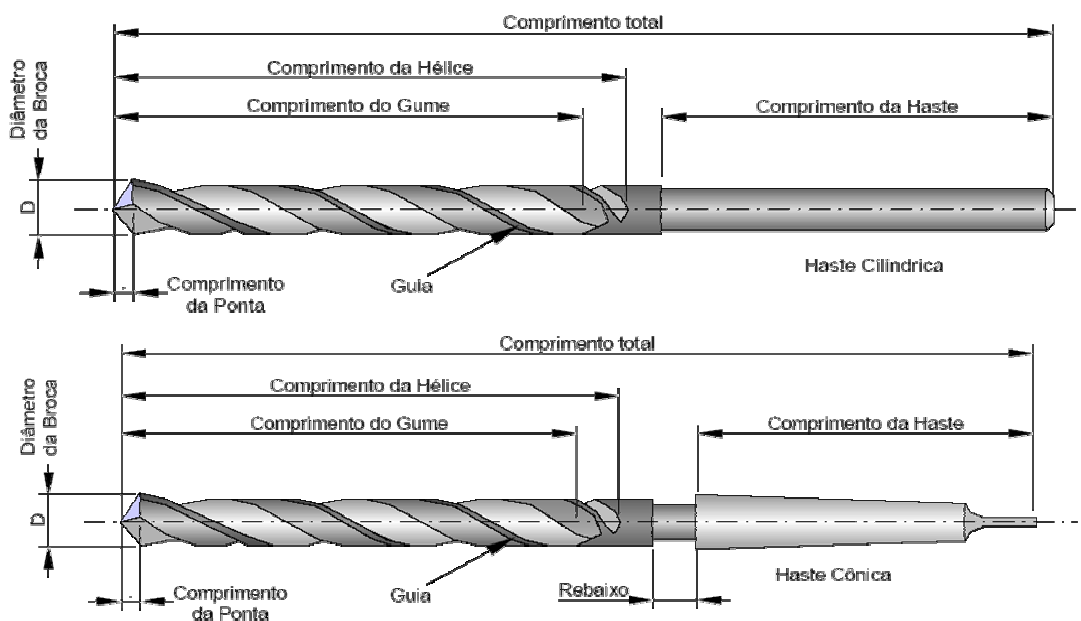


Figura 2.6 – Broca helicoidal com haste (a) cilíndrica e (b) cónica⁷

⁷ Stoeterau, R.L., Introdução aos Processos de Usinagem - Processo de Furação, pp.1-42, 2005

As brocas helicoidais apresentam diversos tamanhos, tanto em comprimento como em diâmetro, para atender à diversidade dimensional dos furos a executar. Além disso, os fabricantes apresentam diversos tipos de brocas, no que diz respeito à forma dos canais, geometria de corte e material constituinte da broca.⁸

2.2.1.1. Geometria de Corte

A ponta da broca, caracterizada pela geometria de corte, desempenha um papel importantíssimo, pois dela depende, não só o rendimento, como também a precisão de execução do furo. A geometria de corte da broca, é obtida de tal forma que a velocidade de corte na aresta de corte varia, obtendo-se deste modo um corte eficiente (*velocidade máxima*) no diâmetro da broca, contrariamente ao que sucede na ponta da broca em que a velocidade de corte é nula [Kalpakjian, 1995; Groover, 1996; Childs et al., 2000].

A geometria de corte adequada para cada aplicação é fortemente dependente do material a maquinar, da profundidade e diâmetro do furo, da qualidade do furo pretendida e do tipo de apara esperada, visto que, esta apresenta influência directa nas forças de corte (*binário, força de avanço*), na potência consumida, na temperatura gerada na broca e na formação de apara à entrada e saída do furo [Stephenson and Agapiou, 1997]. No entanto, a geometria de corte é bastante difícil de obter dado que os seus ângulos constituintes variam ao longo do raio da broca. A título de exemplo, o ângulo de hélice (β) atinge o valor máximo no diâmetro da broca e o valor zero no centro da broca. Tendo em consideração o material a maquinar, foram desenvolvidas diversas geometrias de corte com o objectivo de melhorar os aspectos relacionados com o desempenho da broca, nomeadamente a rigidez e vida útil da ferramenta [Watson, 1985; Stephenson and Agapiou, 1997].

Na Figura 2.7, podemos observar a geometria de corte típica da broca helicoidal sendo esta definida pelo ângulo de ponta (σ), ângulo de saída (α), ângulo de hélice (β) e o ângulo de gume transversal (ψ) [Ema et al., 1988; Boothroyd and Knight, 1989; Kalpakjian, 1995; Groover, 1996; Shaw, 1997; Stephenson and Agapiou, 1997].

De um modo geral, a ponta da broca apresenta uma forma cónica entre as arestas de corte, formando um ângulo entre si designado por ângulo de ponta (σ), conforme se observa na

⁸ Titex Plus® – Precision Cutting Tools; Sandvik Coromant®; Kennametal® - Manufacturer of cutting tools and tooling systems; Guhring®; M.A. Ford – High Performance Cutting Tools

Figura 2.7. Em função do material a maquinar, este ângulo pode apresentar valores compreendidos entre 90 e 135° de forma a promover a vida útil da broca e a qualidade do furo, no entanto, este apresenta um valor típico de 118° para a maioria dos materiais. Ângulos de ponta (σ) inferiores a 118° são utilizados em ferros fundidos, ligas de alumínio, ligas de magnésio e plásticos, enquanto ângulos superiores são utilizados para aços inoxidáveis e materiais endurecidos. De um modo geral, ângulos de ponta compreendidos entre 60-90° conduzem a forças de avanço baixas, porém, implicam um aumento de binário conforme se observa na Figura 2.8 [Edwards, 1993; Kalpakjian, 1995; Groover, 1996; Salama and ElSawy, 1996; Shaw, 1997; Stephenson and Agapiou, 1997].

- α – ângulo de saída ou folga
- β – ângulo de gume/hélice
- γ – ângulo de ataque
- σ – ângulo de ponta
- Ψ – ângulo do gume transversal
- k_r – ângulo da aresta de corte
- ε – ângulo de canto
- r_ε – raio de canto

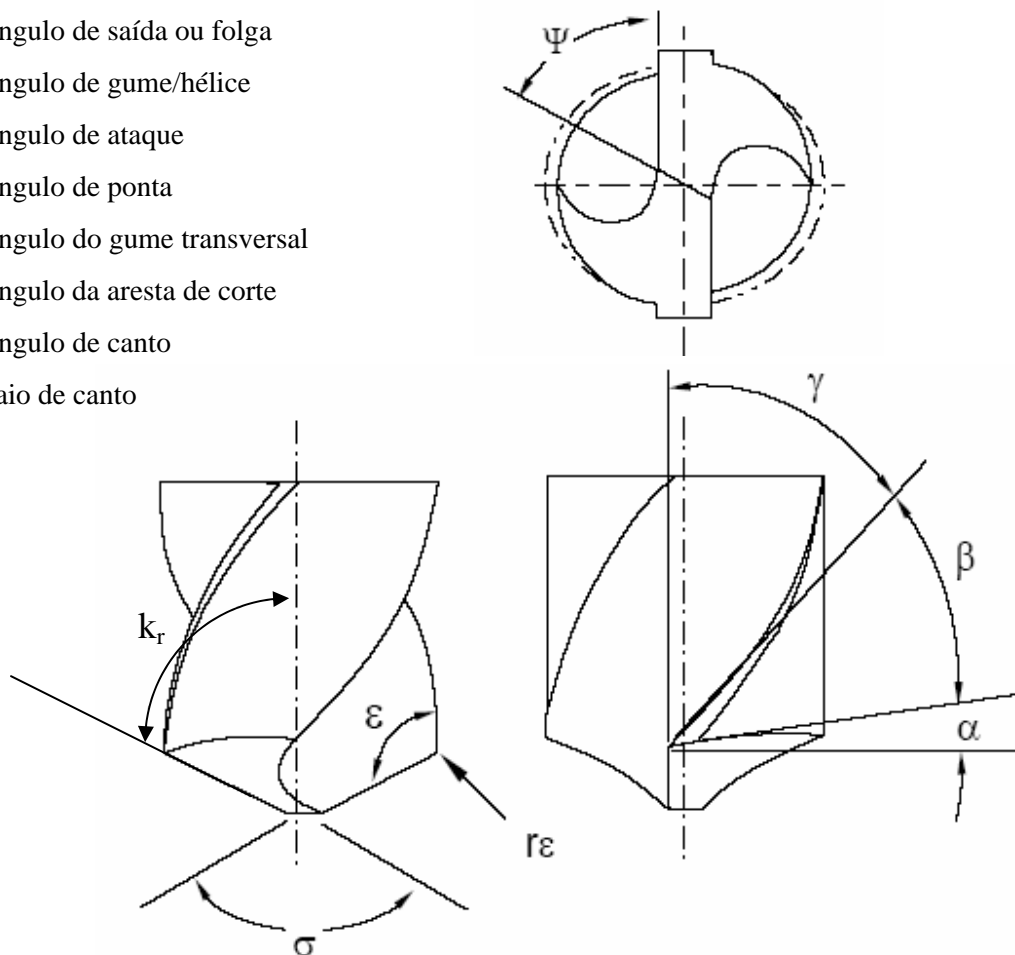


Figura 2.7 – Geometria de corte da broca helicoidal⁹

⁹ International Organization for Standardization ISO 3002/1 (1977), Geometry of the Active Part of Cutting Tools - General Terms, Reference Systems, Tool and Working Angles

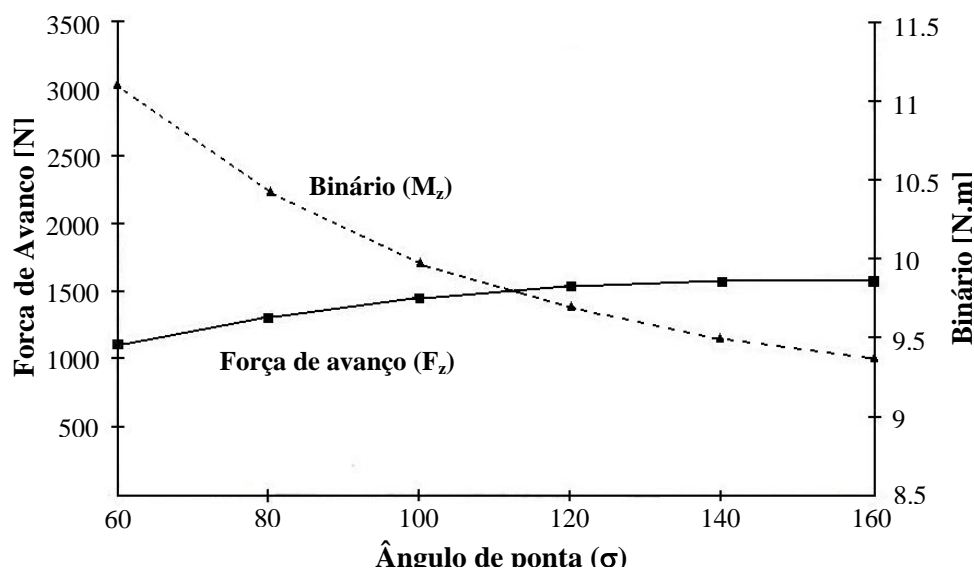


Figura 2.8 – Efeito do ângulo de ponta nas forças de corte [Stephenson and Agapiou, 1997]

Por sua vez, a ponta da broca pode apresentar diversos tipos de geometria, nomeadamente a geometria *cônica*, *radial*, *espiral*, “*Web thinned*”, “*Split*”, “*Bickford*”, “*Four-Facet Chisel*”, “*MultiFacer*”, “*Double angle*” e “*Brad*”, sendo a geometria cônica a mais comum entre elas, Figura 2.9. A geometria cônica ou convencional é o tipo de geometria que usualmente apresenta ângulos de ponta de 118° , sendo vastamente utilizada em operações que não exige elevada taxa de produção e precisão no furo [Watson, 1985; Ema et al., 1988; Stephenson and Agapiou, 1997].

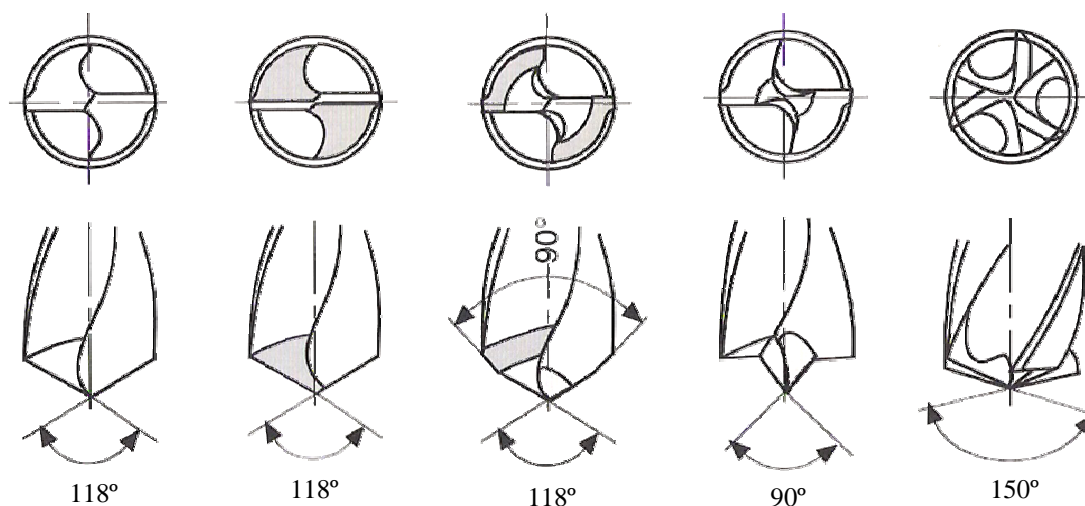


Figura 2.9 – Exemplos do tipo de geometria da ponta da broca helicoidal (a) cônica, (b) quatro facetas, (c) “Double angle” (d) “Brad” e (e) “MultiFacet”¹⁰

¹⁰ www.titex.com - Titex Plus® – Precision Cutting Tools

Para uma correcta realização da operação de furação é fundamental ter em consideração o material a maquinar, dado que a geometria de corte varia em função deste. Os ângulos da geometria de corte apresentados na Tabela 2.1, foram concebidos de forma a produzir furos de precisão, a minimizar as forças de corte, *binário e força de avanço*, e a otimizar a vida útil da ferramenta [Kalpakjian, 1995; Stephenson and Agapiou, 1997]. Note-se, que a mais pequena alteração na geometria de corte conduz a uma influência significativa no desempenho na broca. Ângulos de saída inferiores a 7° provocam um aumento na força de avanço, conduzindo à geração de calor excessivo, que por sua vez conduz ao aumento do desgaste nas arestas de corte da broca, enquanto ângulos superiores a 15° conduzem à fissuração e quebra das arestas de corte. Com o objectivo de melhorar o desempenho da broca helicoidal foram desenvolvidas novas geometrias de corte, no entanto, estas exigiam o recurso a equipamento específico [Kalpakjian, 1995].

Tabela 2.1 – Geometria de corte em função do material a maquinar [Kalpakjian, 1995; Stephenson and Agapiou, 1997]

Material	Ângulo de Ponta (σ) [°]	Ângulo de Hélice (β) [°]	Ângulo de Saída (α) [°]	Ângulo de Gume Transversal (Ψ) [°]
Aços	118 - 124	24 - 32	10 - 15	125 - 135
Aços inoxidáveis	118 - 135	24 - 32	7 - 10	120 - 130
Ferros fundidos	118	24 - 32	8 - 12	125 - 135
Ligas de Alumínio	90 - 118	24 - 48	12 - 15	125 - 135
Ligas de Magnésio	70 - 118	30 - 45	12 - 15	120 - 135
Cobre	118	10 - 30	12 - 15	125 - 135
Plásticos	60 - 90	29 - 40	7	120 - 135

O ângulo formado pelas arestas de corte, usualmente designado por *ângulo de hélice* (β), apresenta um valor típico de 30° para a maioria dos materiais. De acordo com a norma DIN 1836 as brocas são classificadas em três tipos quanto ao ângulo de hélice (β): N, H e W, conforme se observa pela Figura 2.10.

- Tipo N (*normal*) para furação de aços ligados e não ligados, ferro fundido cinzento e maleável e níquel. Ângulos β de 18 a 30°.

- ❑ Tipo H (*para materiais duros*) ferro fundido com dureza superior a 240 HB; latão, bronze e ligas de magnésio. Ângulos β de 10 a 15°;
- ❑ Tipo W (*para materiais dúcteis*) para cobre, alumínio e suas ligas, ligas de zinco, plásticos. Ângulos β de 35 a 45°.

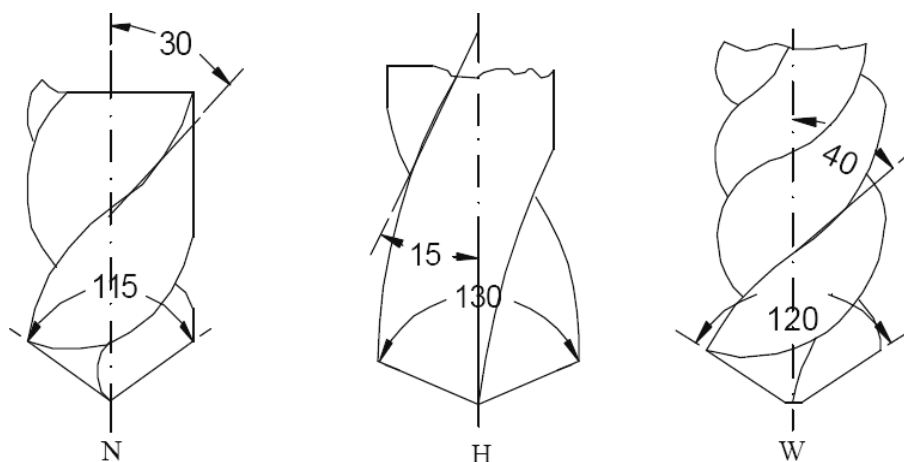


Figura 2.10 – Classificação das brocas quanto ao ângulo de hélice

Ângulos inferiores a 30° promovem o aumento da resistência das arestas de corte e são recomendados para a furação de materiais endurecidos e latão dado que promovem a rápida saída da apar. Ângulos superiores são recomendados para materiais não ferrosos, como o alumínio, magnésio, cobre, zinco e plásticos. O ângulo de hélice, para além de ser função do material a maquinar, apresenta influência no escoamento do material durante a operação de furação, dado que os canais helicoidais que promovem o escoamento da apar ao longo do comprimento do corpo da broca são formados de acordo com este [Edwards, 1993; Groover, 1996; Stephenson and Agapiou, 1997]. Caso este ângulo não seja adequado, o atrito entre a apar e face de ataque aumenta gerando calor excessivo, conduzindo a um baixo desempenho da broca. De qualquer modo, a forma rápida de reduzir o atrito e o calor gerado passa pela utilização de fluídos de corte, contudo, esta operação nem sempre é bem sucedida, visto que a remoção da apar desloca-se no sentido contrário, dificultando a chegada do fluído de corte ao seu destino. A alternativa passa por executar o furo utilizando a técnica do “*pica pau*”, ou seja, o comprimento do furo é executado por pequenos incrementos sucessivos, em que a apar é removida entre cada incremento. Face aos problemas inerentes do processo, *atrito e calor gerado*, a broca helicoidal é

considerada apropriada para a execução de furos de comprimento igual a 4 (quatro) vezes o seu diâmetro [Kalpakjian, 1995; Groover, 1996].

2.2.1.2. Material da Ferramenta de Corte

Para além da geometria de corte da broca, o material constituinte é outro aspecto fundamental, dado que este é dependente do material a maquinar, da qualidade do furo e tolerância dimensional pretendida [Shaw, 1997]. De acordo com os autores, Boothroyd & Knight, 1989, Kalpakjian, S., 1995; Shaw, M., 1997 e Stephenson & Agapiou, 1997, as ferramentas de corte devem possuir os seguintes requisitos:

- ❑ estabilidade química e dureza a quente a altas temperaturas;
- ❑ resistência ao desgaste e fadiga;
- ❑ resistência a fractura frágil;
- ❑ resistência à deformação;
- ❑ boa condutividade térmica.

Contudo, a combinação destes requisitos de forma a alcançar o elevado desempenho não é possível de obter num só material, dado que materiais com elevada dureza a quente e resistência ao desgaste possuem baixa resistência à fractura, ou seja, baixa tenacidade conforme se observa na Figura 2.11. Esta relação não se verifica apenas quando comparadas as diferentes classes de materiais, mas também para as diferentes composições da mesma classe de material [Boothroyd and Knight, 1989; Shaw, 1997; Stephenson and Agapiou, 1997].

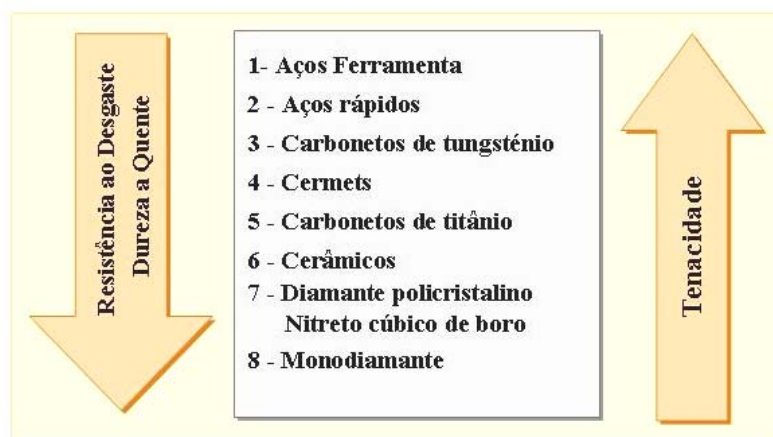


Figura 2.11 – Principais classes de material para ferramentas de corte

Uma selecção incorrecta do material da ferramenta de corte conduz ao colapso prematuro da ferramenta de corte com a consequente inutilização da peça maquinada. A Figura 2.12 relaciona a aplicação dos diversos materiais para ferramentas de corte em função das suas propriedades mecânicas e dos parâmetros de corte (*velocidade de corte e avanço*). O material da ferramenta óptimo deve ser o que maximiza as referidas propriedades e parâmetros de corte [Low and Li, 1996; Stephenson and Agapiou, 1997].

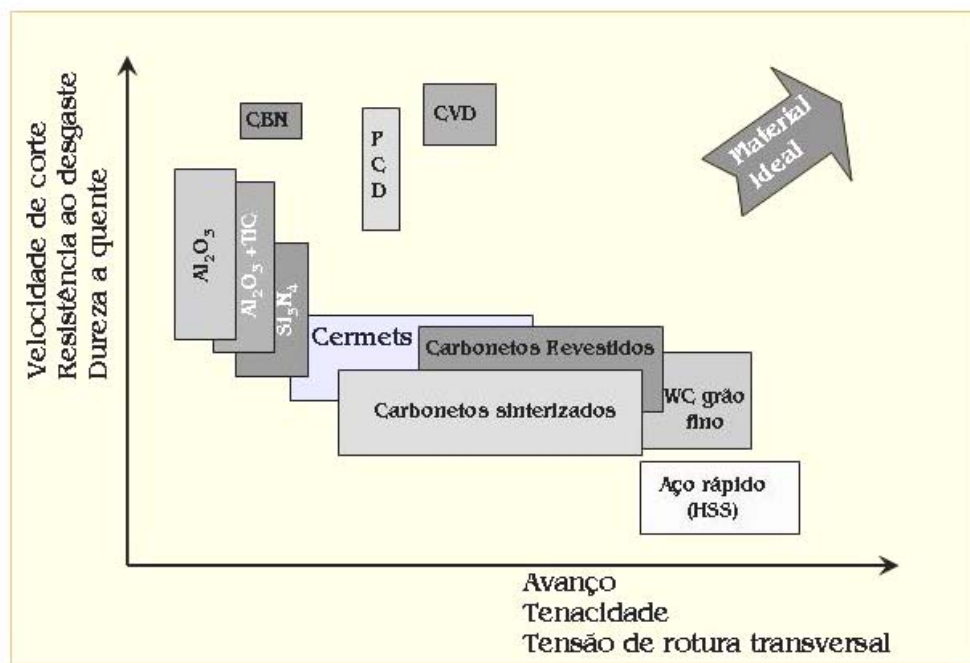


Figura 2.12 – Comparação dos diversos materiais para ferramentas de corte

Para a realização de uma operação de corte com arranque de apra é condição necessária que as ferramentas de corte resistam às condições trabalho impostas durante o processo. Deste modo, a escolha do material para o fabrico das brocas helicoidais, de modo a responder eficazmente ao processo de corte, passa por apresentar propriedades mecânicas e térmicas, tais como: dureza a quente, boa tenacidade, boa resistência à compressão e ao desgaste, resistência térmica e resistência ao choque e à fadiga [Boothroyd and Knight, 1989; Kalpakjian, 1995; Shaw, 1997; Stephenson and Agapiou, 1997]. Tendo em consideração estas propriedades, as brocas helicoidais são fabricadas de um modo geral em aço rápido (HSS - High Speed Steel), e em carboneto de tungsténio (WC), contudo podem ser utilizados materiais como o diamante policristalino (PCD – Polycrystalline Diamond), o

nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN- Polycrystalline cubic boron nitride) em insertos a colocar nas arestas de corte da broca para aplicações especiais [Edwards, 1993; Kalpakjian, 1995; Stephenson and Agapiou, 1997]. As brocas de aço rápido (HSS), são de menor custo, permitem velocidades de corte moderadas e são utilizadas para executar cerca de 80% dos furos na indústria metalomecânica, contudo, apresentam baixa produtividade face ao seu rápido desgaste. Com vista a melhorar o desempenho da broca é usual efectuar revestimentos, nomeadamente, de nitreto de titânio (TiN), o qual melhora de uma forma significativa o seu rendimento, permitindo operar a velocidades de corte e avanços mais elevados e em materiais endurecidos de difícil maquinagem [Edwards, 1993].

As brocas de carbonetos de tungsténio (*com e sem revestimento*) apresentam maior resistência ao desgaste, sendo recomendadas para a furação de materiais de elevada resistência mecânica como os aços temperados e ferros fundidos muito duros e materiais abrasivos, sendo exemplo disso, os materiais compósitos reforçados a fibras de vidro e carbono [Kalpakjian, 1995; Stephenson and Agapiou, 1997]. Estas brocas, comparativamente com as brocas de aço rápido (HSS) suportam temperaturas mais elevadas em situações que a relação profundidade do furo e diâmetro é superior a dois (2) e a lubrificação é escassa. De um modo geral, estas brocas são empregues para execução de furos com elevada precisão, permitindo velocidades de corte duas a três vezes superiores às brocas de aço rápido, no entanto, requerem avanços mais baixos [Stephenson and Agapiou, 1997].

2.3 Avaliação do Processo de Furação

A correcta avaliação do processo de furação deve contemplar aspectos relativos ao processo de corte (*parâmetros processuais, forças de corte*), à ferramenta de corte (*desgaste e vida da ferramenta*) e à peça maquinada (*acabamento de superfície e precisão dimensional*), contudo, deve-se considerar que existem factores que afectam indirectamente a avaliação do processo, citam-se por exemplo, o material e geometria da ferramenta, o material a maquinar e a rigidez do sistema (máquina/peça/ferramenta) [Stephenson and Agapiou, 1997].

A Figura 2.13 ilustra a avaliação da furação contemplando os aspectos mencionados anteriormente.

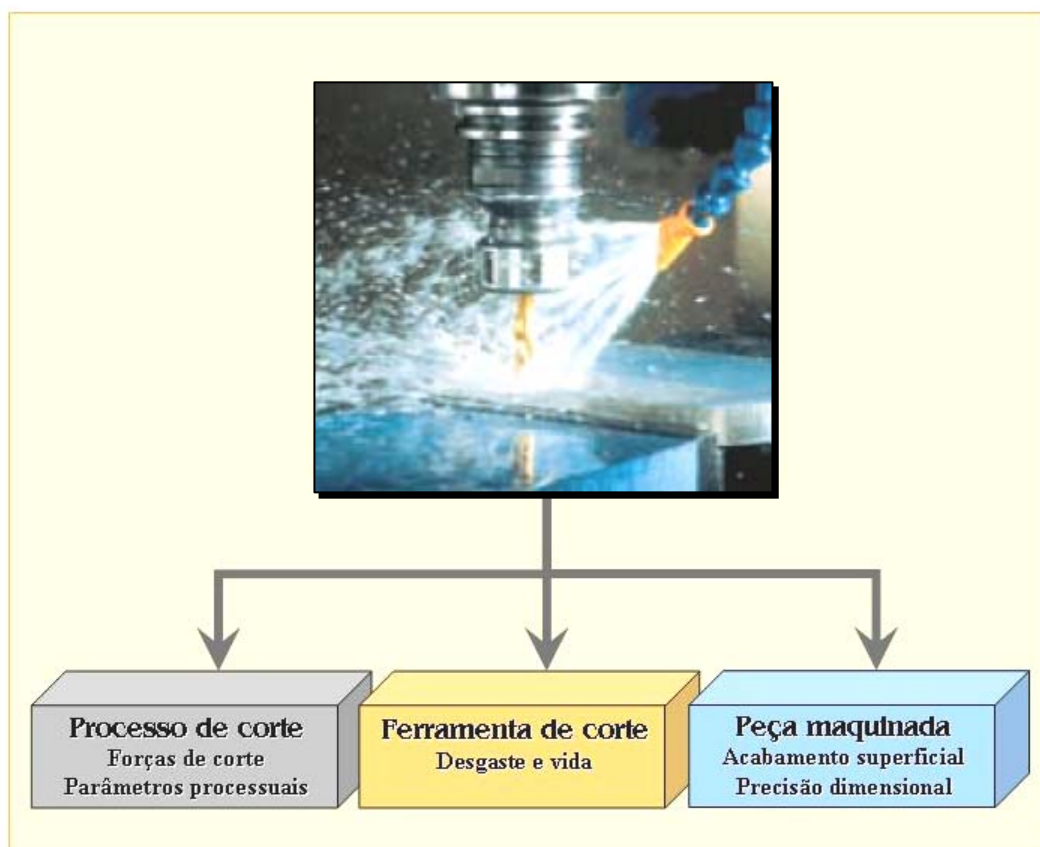


Figura 2.13 – Aspectos fundamentais na avaliação do processo de furação¹¹

Tendo em consideração que estes aspectos são fundamentais para a correcta avaliação da furação, é efectuada de seguida uma breve descrição de cada um deles.

2.3.1 Processo de Corte

2.3.1.1. Parâmetros Processuais

A selecção das condições de corte a utilizar em cada operação de maquinagem, nomeadamente, aspectos relacionados com o equipamento (*máquina*), ferramenta de corte (*material e geometria*) e parâmetros processuais deverão ser levados em consideração para a correcta execução de qualquer operação de maquinagem. A geometria da peça, a maquinabilidade do material e a qualidade de superfície são factores que influenciam significativamente as condições de corte a seleccionar [Groover, 1996].

¹¹ www.coromant.sandvik.com - Sandvik Coromant®

Tendo em consideração que aspectos relacionados com a ferramenta de corte, *material e geometria da broca*, foram abordados na Secção 2.2.1, passamos a abordar os parâmetros processuais. Os parâmetros processuais, em qualquer processo de maquinagem, englobam grandezas como a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte. A velocidade de corte e o avanço são seleccionados tendo em vista a qualidade do material da broca, o material a furar e o diâmetro da broca. È esperado que se obtenha melhor resultado utilizando elevadas velocidades de corte e baixos avanços, visto que a utilização de avanços elevados podem conduzir à fractura da broca [Boothroyd and Knight, 1989; Groover, 1996; Stephenson and Agapiou, 1997].

A velocidade de corte, numa operação de furação, é definida como a velocidade periférica devida ao movimento de rotação da broca exprimindo-se em [m/min]. Esta varia em função do diâmetro da broca, verificando-se que a velocidade de corte na aresta de corte varia ao longo do seu comprimento, sendo máxima para o diâmetro da broca [Boothroyd and Knight, 1989; Altıng, 1994; Groover, 1996; Stephenson and Agapiou, 1997].

Na operação de furação é usual empregar-se a velocidade de rotação (n) sendo esta expressa em rotações por minutos [rpm] e determinada através da seguinte expressão:

$$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D} \quad (2.2)$$

sendo, V_c a velocidade de corte em [m/min] e D o diâmetro da broca em [mm]

Como o número de rotações (n) é proporcional à velocidade de corte (V_c) e ao diâmetro da broca (d), facilmente se constroem gráficos que indiquem o número de rotações (n) para cada velocidade de corte e para os vários diâmetros das brocas, conforme se ilustra na Figura 2.14.

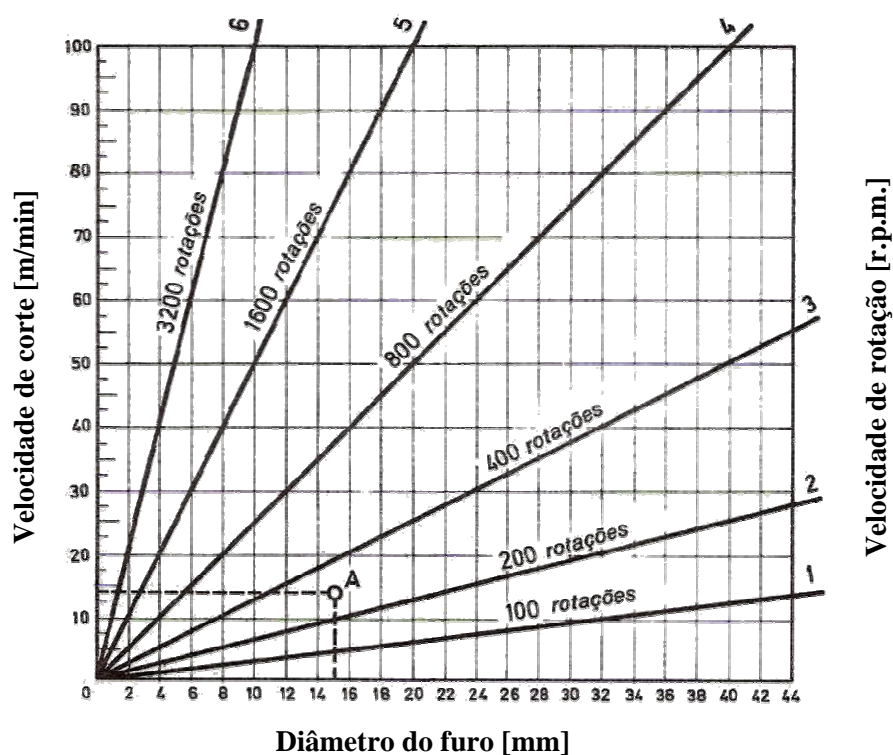


Figura 2.14 – Gráfico de velocidades de corte e rotação em função do diâmetro da broca [Ruas, 1982]

Na Tabela 2.2 é possível observar a velocidade de corte e avanço recomendadas, em função do diâmetro da broca, para a broca helicoidal de aço rápido (HSS). As brocas de carbonetos de tungstênio operam a velocidade de corte mais elevadas. [Kalpakjian, 1995; Shaw, 1997].

Tabela 2.2 – Parâmetros processuais (V_c e a) recomendados para brocas helicoidais de aço rápido (HSS) [Kalpakjian, 1995; Shaw, 1997]

Material	Velocidade de corte [m/min]	Avanço [mm/rot]	
		Diâmetro da broca [mm]	
		1.5	12.5
Aços	20 - 30	0.025	0.3
Aços inoxidáveis	6 - 20	0.025	0.18
Ferros fundidos	20 - 60	0.025	0.3
Alumínio	30 - 122	0.025	0.3
Cobre	15 - 90	0.025	0.25
Latão e Bronze	30 - 92	0.025	0.25
Magnésio	45 - 120	0.025	0.3
Titânio	3 - 8	0.01	0.15
Polímeros Termoplásticos	30 - 60	0.025	0.13
Polímeros Termoendurecíveis	20 - 60	0.025	0.1

O avanço (a) corresponde ao deslocamento longitudinal da ferramenta relativa à peça por cada rotação do veio principal da máquina, e exprime-se em mm/rot. O avanço (a) a utilizar na operação de furação, para além de ser dependente do material a maquinar, é função do diâmetro da broca, ou seja, pequenos diâmetros implicam pequenos avanços e vice-versa, Tabela 2.3. Da mesma forma que a velocidade de corte, o valor do avanço (a) pode ser obtido através de gráficos, Figura 2.15 [Edwards, 1993; Groover, 1996].

Tabela 2.3 – Valores do avanço em função do diâmetro da broca [Edwards, 1993; Groover, 1996]

Diâmetro da broca [mm]	Avanço [mm/rot]
até 3	0.02 - 0.05
3 - 6	0.05 - 0.1
6 - 12	0.1 - 0.2
12 - 25	0.2 - 0.4
acima de 25	0.4 - 0.6

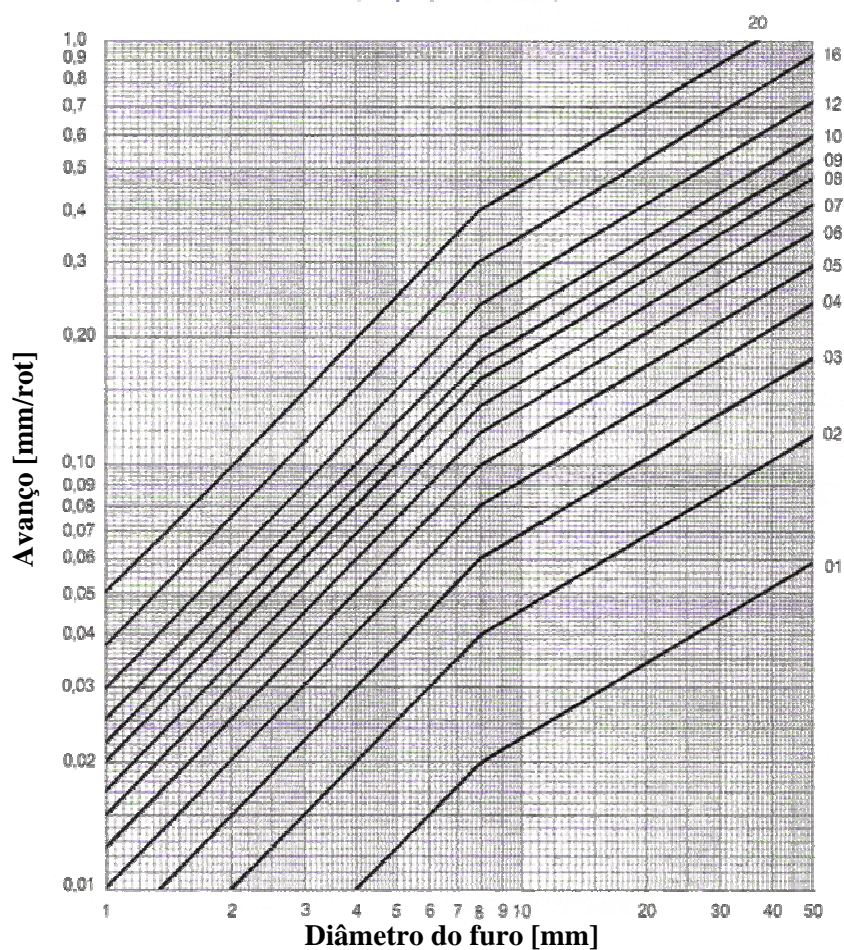


Figura 2.15 – Gráfico de avanço em função do diâmetro da broca¹²

Como na operação de furação utilizam-se ferramentas de corte de aresta múltipla, é usual empregar-se o avanço por aresta de corte (a_z), sendo este medido na direcção paralela ao movimento de avanço e obtido através da seguinte expressão [Boothroyd and Knight, 1989; Stephenson and Agapiou, 1997]:

$$a_z = \frac{a}{z} \quad (2.3)$$

sendo, a o avanço em [mm/rot] e z o número de arestas de corte

Relativamente à profundidade de corte (a_p), usualmente designada por *penetramento* (p), esta é definida pela geometria de corte, sendo igual ao raio da broca. O penetramento, no caso particular da furação, pode ser distinguido pelo penetramento radial (p_r) e

¹² www.titex.com - Titex Plus® – Precision Cutting Tools

penetramento axial (p_a), conforme se observa na Figura 2.16. O penetramento radial (p_r), é medido na direcção perpendicular ao eixo de rotação da broca e apresenta um valor máximo igual ao raio da broca, enquanto o penetramento axial (p_a) é medido na direcção paralela ao eixo de rotação da broca e apresenta um valor máximo igual ao avanço por dente (a_z) [Boothroyd and Knight, 1989; Edwards, 1993; Groover, 1996; Childs et al., 2000].

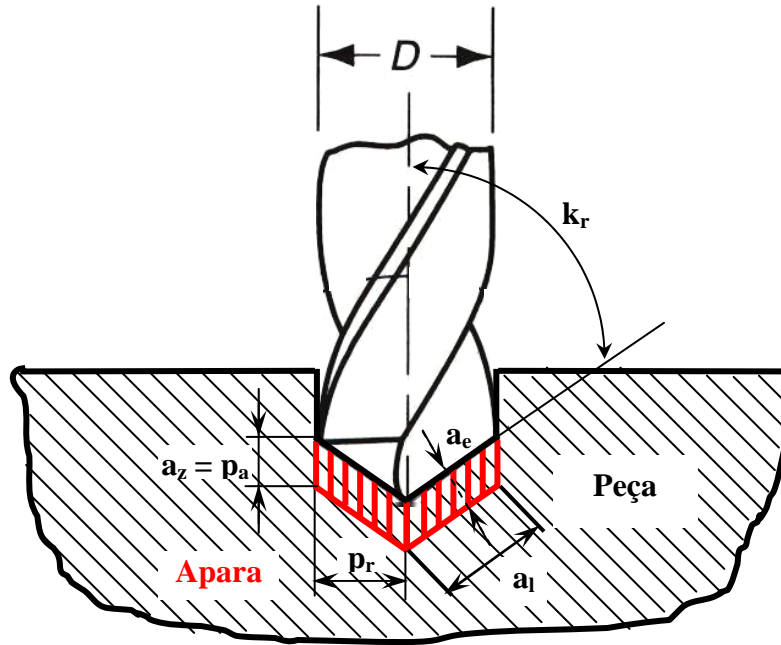


Figura 2.16 – Ilustração do penetramento radial (p_a) e axial (p_r) na operação de furação

De acordo com Boothroyd and Knight, 1989; Stephenson and Agapiou, 1997; Childs et al., 2000, a espessura (a_e) e a largura da apara antes do corte (a_l) é dada pelas seguintes expressões:

$$a_e = a_z \times \sin(k_r) \quad (2.4)$$

sendo a_z o avanço por aresta de corte em [mm/rot] e k_r o ângulo da aresta de corte

$$a_l = \frac{D}{2 \times \sin(k_r)} \quad (2.5)$$

sendo, D o diâmetro da broca em [mm] e k_r o ângulo da aresta de corte

Tendo em consideração que a espessura (a_e) e a largura da apara (a_l) são duas grandezas, é possível determinar a secção da apara antes do corte (S_a) através da seguinte expressão [Boothroyd and Knight, 1989; Stephenson and Agapiou, 1997]:

$$S_a = a_e \times a_l \quad (2.6)$$

sendo, a_e e a_l a espessura e largura da apara antes do corte, respectivamente em [mm]

Substituindo as expressões (2.4) e (2.5) na expressão (2.6) obtém-se a expressão da secção da apara antes do corte (S_a) para a operação de furação.

$$S_a = \frac{a}{z} \times \text{sen}(k_r) \times \frac{D}{2 \times \text{sen}(k_r)} = \frac{a \times D}{4} \quad (2.7)$$

sendo, a o avanço em [mm/rot], e D o diâmetro da broca em [mm].

A forma da apara obtida durante um processo de maquinagem depende de diversos factores, tais como, o material a maquinar, o material e geometria da ferramenta e parâmetros processuais (*velocidade corte, avanço e penetramento*). No entanto, é usual que a apara, na operação de furação, se apresente na forma helicoidal cónica, face à geometria de corte da broca [Boothroyd and Knight, 1989; Stephenson and Agapiou, 1997; Childs et al., 2000]. A forma da apara encontra-se classificada e normalizada de acordo com a norma ISO 3685:1993¹³.

Para além da velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, o fluído de corte apesar de não ser considerado uma grandeza de corte, é um aspecto importante em qualquer operação de maquinagem, dado que promove a redução do coeficiente de atrito e a diminuição da temperatura no corte, conduzindo ao aumento da vida da ferramenta e da qualidade superficial [Boothroyd and Knight, 1989; Kalpakjian, 1995; Groover, 1996]. O desenvolvimento de calor no corte por arranque de apara deve-se, para além da deformação plástica da apara, sobretudo ao atrito entre a apara e a face de ataque da ferramenta de corte. [Ferraresi, 1977; Boothroyd and Knight, 1989]. Adicionalmente, o fluído de corte permite melhorar a qualidade superficial, a estabilidade dimensional da peça e diminuir a força e potência de corte. De um modo geral, o fluído de corte apresenta-se na forma líquida ou gasosa.

¹³ ISO 3685:1993- Tool-life testing with single-point turning tools, Chips Characteristics

2.3.1.2. Forças de Corte

A medição das forças de corte é um processo vastamente utilizado na investigação, de forma a permitir a comparação da maquinabilidade dos materiais, especialmente, em casos em que a execução de ensaios de forma a estipular a vida útil da ferramenta não é viável face à escassez de material ou a restrições de tempo. Hoje em dia, existem modelos que determinam as forças de corte em função dos parâmetros processuais (*velocidade de corte, avanço, profundidade de corte*), da geometria e material da ferramenta e das propriedades do material a maquinar. As forças de corte são medidas através de dinamómetros e dependem fortemente do avanço e da profundidade de corte, independentemente do material a maquinar [Kalpakjian, 1995; Stephenson and Agapiou, 1997].

No processo de furação, o sistema de forças aplicadas na broca helicoidal é composto pela força de avanço (F_z), força radial (F_r) e binário (M_z), conforme se observa na Figura 2.17 [Stephenson and Agapiou, 1997; Yang et al., 2001; Pirtini and Lazoglu, 2005].

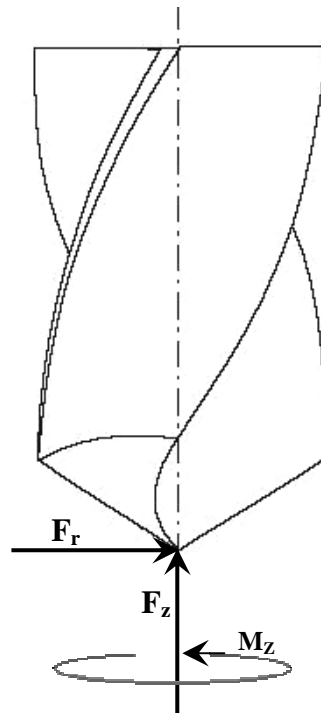


Figura 2.17 – Forças de corte inerentes ao processo de furação

A força de avanço depende de diversos factores entre os quais: resistência do material a maquinar, parâmetros processuais (*avanço e velocidade de corte*), utilização de fluídos de corte e geometria e diâmetro da broca [Kalpakjian, 1995]. Caso a força de avanço seja

excessiva durante a operação, esta pode conduzir à flexão e fractura da broca, enquanto o binário excessivo pode conduzir à deformação do material a maquinar. A força de avanço (F_z) pode apresentar valores compreendidos entre os 3 e 100 kN, em função do diâmetro da broca e do material a maquinar, enquanto o binário (M_z) pode atingir valores máximos na ordem dos 4000 N.m. O aumento das forças de corte no processo de furação, encontra-se directamente relacionado com o desgaste da broca, isto é, a força de avanço (F_z), a força radial (F_r) e o binário (M_z), aumentam significativamente com o aumento do desgaste no flanco (VB) da broca [Kalpakjian, 1995]. A Figura 2.18 ilustra, a título de exemplo, a força de avanço (F_z) e o binário (M_z), na operação de furação de um material metálico (*Anticorodal AC100-AlMgSi*) com uma broca helicoidal de carbonetos de tungsténio ($\phi = 8.5\text{mm}$) utilizando uma velocidade de corte de 400m/min e um avanço de 0.4mm/rot.

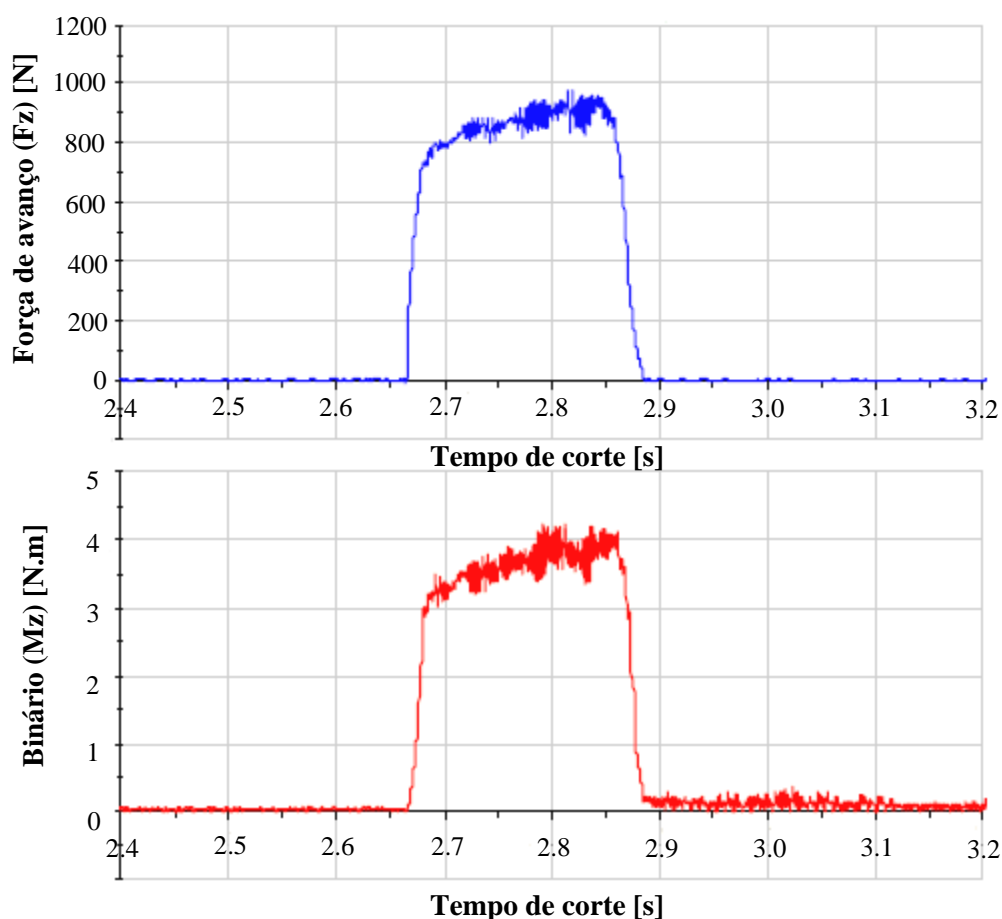


Figura 2.18 – Aspecto da força de avanço (F_z) e (b) binário (M_z) numa operação de furação¹⁴

¹⁴ Stirnimann, J., Tschanz, P. Unzicker, K. “New Rotating Dynamometer for the Analysis of High Speed Metal-Cutting Processes”, Kistler Instrumente AG, Switzerland, Tech Note - SD920-229e-11.02.

Os valores obtidos da força de avanço (F_z) e binário (M_z) podem ser utilizados para avaliar a furação ao nível do processo de corte, nomeadamente, na determinação da força específica de corte (K_s) e da potência de corte (P_c) [Kalpakjian, 1995; Stephenson and Agapiou, 1997].

A força específica de corte (K_s), normalmente designada por “pressão específica de corte”, é dada pelo quociente da força de corte (F_c) pela secção da avara (S_a) [Boothroyd and Knight, 1989; Shaw, 1997; Stephenson and Agapiou, 1997]:

$$K_s = \frac{F_c}{S_a} \quad (2.8)$$

sendo, F_c a força de corte em [N] e S_a a secção da avara em [mm²]

Tendo em consideração a Figura 2.19, o binário (M_z) é determinado pela seguinte expressão:

$$M_z = \frac{D}{2} \times F_c \quad (2.9)$$

sendo, D o diâmetro da broca em [mm] e F_c a força de corte em [N]

Substituindo as expressões (2.7), (2.9) na expressão (2.6) obtém-se a expressão da força específica de corte (K_s) para a operação de furação:

$$K_s = \frac{8 \times M_z}{a \times D^2} \quad (2.10)$$

sendo, M_z o binário em [N.m], a o avanço em [mm/rot] e D o diâmetro nominal da broca em [mm].

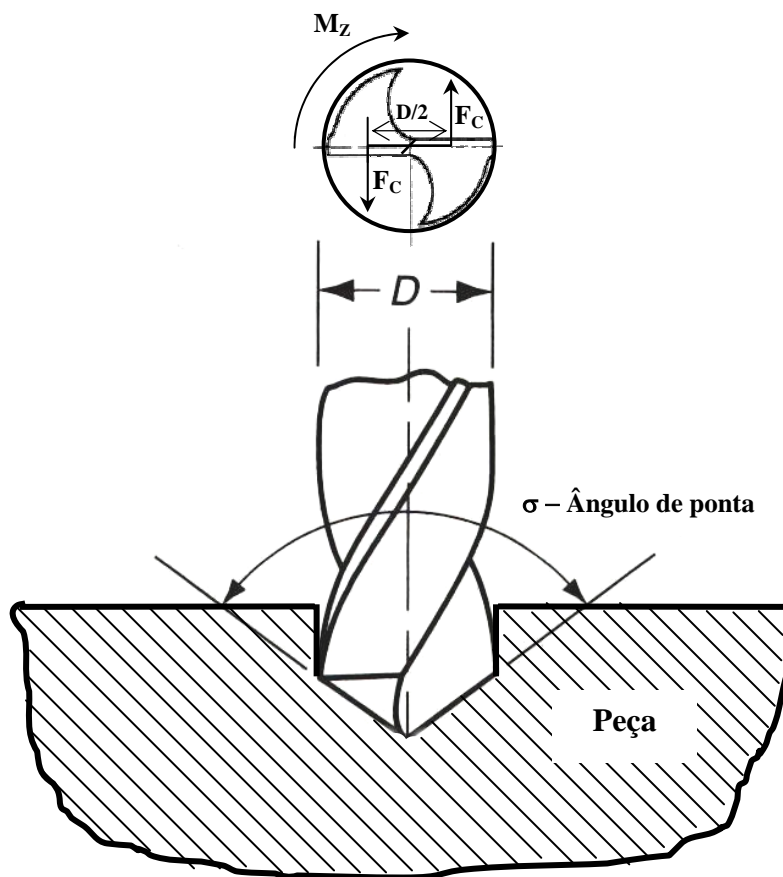


Figura 2.19 – Forças de corte inerentes ao processo de furação

De um modo geral, a potência necessária para a execução de uma operação de maquinagem é definida por potência de corte (P_c), sendo esta determinada na operação de furação pelo produto entre o binário (M_z) e a velocidade de corte angular (ω) [Stephenson and Agapiou, 1997].

$$P_c = M_z \times \omega \quad (2.11)$$

sendo, M_z o binário em [N.m], ω a velocidade angular em [rad/s]

2.3.2 Ferramenta de Corte

2.3.2.1. Desgaste e Vida Útil da Broca Helicoidal

A broca helicoidal, de um modo geral, apresenta quatro zonas típicas de desgaste: o desgaste de cratera, desgaste na aresta de corte (*flanco*), desgaste no gume transversal e

desgaste nas guias, face de ataque/quina, conforme se observa na Figura 2.20 [Stephenson and Agapiou, 1997; Sandvik_Coromant_Tools®, 2005]

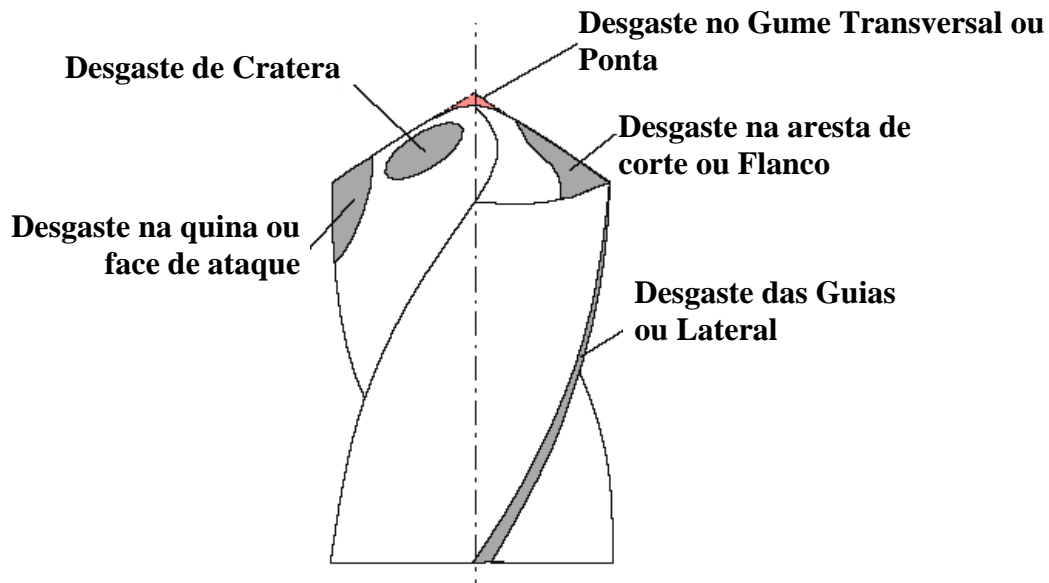


Figura 2.20 – Zonas típicas de desgaste na broca helicoidal

O **desgaste no gume transversal ou ponta** ocorre no centro da broca sob o mecanismo de abrasão ou deformação plástica, conduzindo ao aumento da força de avanço (2 a 3 vezes).

O **desgaste na aresta de corte ou flanco** ocorre ao longo da face de saída da broca junto à aresta de corte sob o mecanismo de abrasão ou deformação plástica conduzindo ao aumento da força de avanço, da potência consumida e da temperatura gerada na aresta de corte, que por sua vez conduz a um desgaste por difusão. Por outro lado, conduz também ao aumento do tamanho da rebarba, “*burr*”. Quando este desgaste se torna excessivo a broca acaba por perder o poder de corte e pode fracturar.

O **desgaste de cratera** ocorre na face de ataque sob o mecanismo de difusão. Este desgaste de um modo geral não é preocupante, contudo a partir do momento que este apresenta um desgaste excessivo conduz ao enfraquecimento da aresta de corte, conduzindo por sua vez à deformação, à fissuração e fractura da aresta de corte.

Finalmente, o **desgaste das guias, face de ataque/quina** ocorre sob o mecanismo de abrasão e difusão que conduz a baixos acabamentos superficiais e imprecisão do furo [Stephenson and Agapiou, 1997].

De um modo geral, o desgaste no *gume transversal e na aresta de corte* resultam de uma força excessiva, enquanto o *desgaste de cratera e nas guias* resultam de um calor excessivo gerado. Ambos os desgastes podem ser reduzidos através da redução do avanço e velocidade de corte, respectivamente. A alternativa para reduzir as temperaturas geradas durante o corte passa pela utilização de fluídos de corte. Na Tabela 2.4 são apresentadas, de uma forma resumida, as medidas preventivas com vista a reduzir os tipos e mecanismos de desgaste que ocorrem na broca helicoidal [Stephenson and Agapiou, 1997].

Tabela 2.4 – Métodos para reduzir o desgaste que ocorre na broca helicoidal [Stephenson and Agapiou, 1997]

Tipo de Desgaste	Mecanismo	Características	Medida preventiva
Desgaste de cratera	Difusão	Cratera formada	reduzir velocidade de corte aumento ângulo de hélice utilizar broca revestida utilizar broca de material duro
Desgaste na aresta de corte / flanco	Abrasão		utilizar broca de material duro reduzir velocidade de corte e avanço utilizar fluido de corte
Desgaste nas guias	Difusão	Furo inferior ao diâmetro da broca	utilizar broca de material duro reduzir velocidade de corte utilizar broca de ponta espiral
Desgaste no gume transversal	Abrasão		reduzir avanço utilizar broca de material duro

Na maioria dos casos, a troca do material da broca torna-se mais económico do que reduzir os parâmetros processuais (*velocidade de corte e avanço*). O aumento da dureza a quente conduz à redução do desgaste nas diversas zonas sendo principalmente eficaz na redução do desgaste nas guias. O aumento da vida útil da broca passa pela utilização de brocas de aço rápido revestidas a nitreto de titânio (TiN) ou brocas de carboneto de tungsténio sinterizadas (WC-Co) em detrimento das brocas de aço rápido (HSS). As brocas revestidas (TiN) reduzem o desgaste nas guias e na cratera, conduzindo à execução de furos precisos [Stephenson and Agapiou, 1997]. A utilização de brocas com desgaste, designadas na prática por brocas “cegas” aumentam as forças de corte, causam danos na superfície e

produzem furos imprecisos [Kalpakjian, 1995]. De forma a evitar a ocorrência deste tipo de problemas, apresenta-se na Tabela 2.5 os valores de desgaste máximos admitidos para o desgaste na aresta de corte/flanco e no desgaste da cratera. O lascamento ou fissuramento da aresta de corte não deve exceder as recomendações para desgaste máximo, a fim de permitir a reafiação e obter vida útil máxima da ferramenta [Sandvik_Coromant_Tools®, 2005].

Tabela 2.5 – Valores de desgaste de flanco e de cratera máximos recomendados¹⁵

Diâmetro da Broca [mm]	Desgaste de Flanco (VB) [mm]			Desgaste de Cratera (KB) [mm]		
	1	2	3	1	2	3
3 - 6	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
6 - 10	0.20	0.20	0.25	0.25	0.25	0.25
10 - 14	0.25	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30
14 - 17	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30	0.30
17 - 20	0.30	0.30	0.35	0.35	0.35	0.35

Os valores de desgaste do flanco/aresta de corte (VB) e da cratera (KB) apresentados anteriormente foram obtidos de acordo com a Figura 2.21.

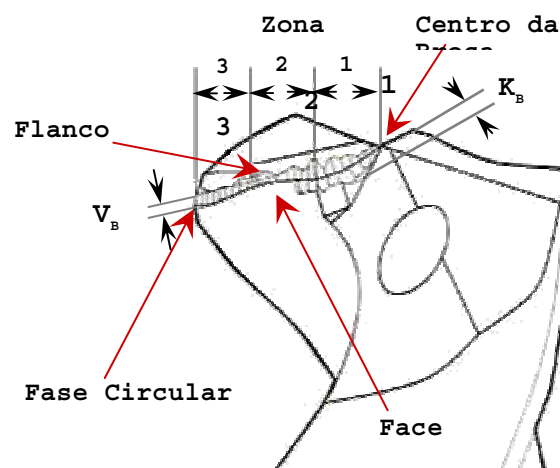


Figura 2.21 – Definição dos valores máximos de desgaste de flanco (VB) e da cratera (KB)¹⁶

¹⁵ www.coromant.sandvik.com - Sandvik Coromant®

¹⁶ www.coromant.sandvik.com - Sandvik Coromant®

O conceito de vida útil de uma ferramenta de corte (T), de um modo geral, associa o tempo de corte efectivo de uma aresta de corte em condições efectivas de trabalho antes de ser necessário afiá-la ou substituí-la. Este conhecimento apresenta grande importância na prática industrial, dado que permite antecipadamente determinar o tempo que a ferramenta opera antes da sua substituição. Após a selecção do material a maquinar, do material e geometria da ferramenta, a velocidade de corte é o factor mais significativo na vida útil da ferramenta [Boothroyd and Knight, 1989; Shaw, 1997; Stephenson and Agapiou, 1997].

No caso da operação de furação, a vida útil da ferramenta (T) é usualmente estabelecida em função do número de furos (N) efectuados até ao momento em que esta apresenta desgaste excessivo afim de perder o seu poder de corte. Uma forma de estabelecer a vida útil da broca é por intermédio da medição das forças de corte, *avanço e binário*. Após a execução de um determinado número de furos, verifica-se que o binário e a força de avanço apresentam um aumento significativo, indicando um desgaste excessivo na broca. O ponto de transição ilustrado na Figura 2.22 estabelece a vida útil da broca helicoidal, através do número de furos (N) efectuados. Outras técnicas, como a monitorização de vibrações e emissão acústica, servem também para determinar a vida útil da broca, sendo particularmente eficazes em operações de furação sob controlo [Kalpakjian, 1995].

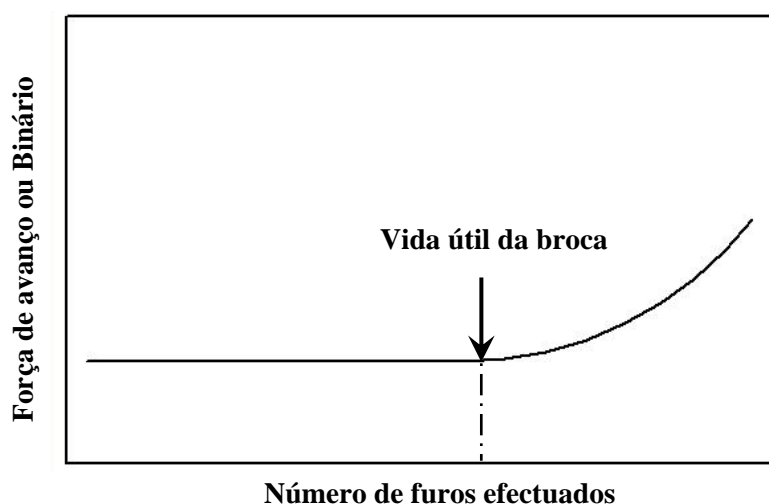


Figura 2.22 – Determinação da vida útil da broca com recurso às forças de corte [Kalpakjian, 1995].

A vida útil da ferramenta, *broca*, diminui com o aumento da velocidade de corte durante a furação de materiais abrasivos. Quando o desgaste ocorre preferencialmente sob o

mecanismo de abrasão, é possível estimar o número de furos (N) a realizar e o tempo de vida da ferramenta (T) até ao fim desta, através das expressões (2.12) e (2.13) [Stephenson and Agapiou, 1997].

O número de furos (N) a realizar depende directamente do avanço (a) e é inversamente proporcional à velocidade de corte (V_c), sendo determinado pela seguinte expressão:

$$N = C_1 \times \frac{V_B \times a}{(V_c)^x} \quad (2.12)$$

sendo, V_B o desgaste do flanco em [mm], a o avanço em [mm/rot], V_c a velocidade de corte em [m/min], C_1 e x , constantes empíricas.

Por sua vez, o tempo de vida da ferramenta (T) é independente do avanço (a) e inversamente proporcional à velocidade de corte (V_c), sendo determinado pela seguinte expressão:

$$T = C_2 \times \frac{V_B}{(V_c)^{x+1}} \quad (2.13)$$

sendo, V_B o desgaste em [mm], V_c a velocidade de corte em [m/min], C_2 e x , constantes empíricas.

2.3.3 Furo

A maioria das superfícies funcionais ou não funcionais são obtidas por processos de corte por arranque de apra, sendo estes processos utilizados de forma a obter geometrias definidas, tolerâncias e qualidade de superfície pretendidas. No entanto, as características intrínsecas a cada processo de corte, as condições de corte, a geometria da ferramenta, a dureza do material a maquinar, entre outros, condicionam a qualidade superficial da peça maquinada. Deste modo, é de extrema importância efectuar a escolha das condições de corte, geometria e material da ferramenta, de forma a conduzir a qualidade de superfície e tolerâncias dentro dos parâmetros pretendidos.

2.3.3.1. Acabamento de Superfície

O processo de corte, para além de definir a geometria e dimensão final da peça, define a qualidade de superfície da peça. No caso do processo de furação, é possível obter qualidades superficiais, isto é, valores de rugosidade média aritmética (R_a) compreendidos

entre 0.81 e 0.63 μm , sendo estes valores facilmente obtidos em equipamentos modernos, como os centros de maquinagem verticais, [Kalpakjian, 1995; Groover, 1996]. A qualidade de superfície é fortemente condicionada por factores geométricos, vibrações e factores associados ao material a maquinar. No que diz respeito a factores geométricos, estes incluem a geometria da ferramenta de corte, o tipo de operação de maquinagem e o avanço. A superfície geométrica resultante da combinação destes factores é considerada como sendo a rugosidade média aritmética teórica (R_{at}) em que a qualidade superficial é obtida com a ausência de vibrações e factores associados ao material a maquinar [Groover, 1996]. Relativamente às vibrações, estas encontram-se relacionadas com o equipamento, ferramenta de corte e o “setup” da operação. As medidas preventivas passam pela redução do avanço, alteração da geometria de corte e operar a velocidades de corte que não conduzam à frequência de vibração natural do equipamento. Os factores associados ao material a maquinar incluem a formação da aresta postiça de corte ou apara aderente, o enrolamento da apara conduzindo a um dano na superfície (*marcas, riscos*) e o atrito entre a ferramenta e a superfície maquinada [Groover, 1996].

2.3.3.2. Precisão Dimensional

Os processos de maquinagem por arranque de apara são automaticamente recomendados para a obtenção de tolerâncias apertadas, em que estes processos conduzem a precisões elevadas comparativamente a outros processos. Contudo, é necessário ter em consideração que as tolerâncias apertadas são obtidas quando existem condições à priori para tal, isto é, se o equipamento é demasiado antigo e apresenta folgas torna-se difícil de obter as tolerâncias exigidas. Na Tabela 2.6, apresentam-se as tolerâncias em função do diâmetro do furo, para a operação de furação e mandrilagem. A título de exemplo, se um produto exigir uma tolerância de 0.076mm no diâmetro de um furo de 6.35mm, esta tolerância é facilmente obtida na operação de furação. No entanto, se a tolerância for mais apertada (0.025), é necessário recorrer à operação de mandrilagem tendo como consequência o custo superior de fabrico, conforme se observa na Tabela 2.6 [Groover, 1996].

Tabela 2.6 – Tolerâncias obtidas na operação de furação e mandrilagem

	Tolerância (\pm) [mm]				
	0.025	0.05	0.075	0.0125	0.25
Operação de Furação					
Diâmetro < 2.54 mm					
2.54<Diâmetro<6.35					
6.35<Diâmetro<12.7					
12.7<Diâmetro<25.4					
Diâmetro > 2.54 mm					
Operação de Mandrilagem					
Diâmetro < 12.7 mm					
12.7<Diâmetro<25.4					
Diâmetro > 2.54 mm					

2.3.3.3. Defeitos Geométricos

Durante a execução de um furo podem surgir diversos defeitos geométricos (*erros de forma*), erros de posicionamento, circularidade e dimensão, conforme ilustra a Figura 2.23. Estes defeitos surgem quando a operação de furação é realizada na ausência de um estudo prévio das condições associadas, como é o caso das condições de corte, a geometria da ferramenta, a dureza do material a maquinar, entre outros. A formação de rebarda na entrada e saída dos furos é comum, degradando a qualidade superficial do furo e conduzindo ao aumento do erro no diâmetro do furo.

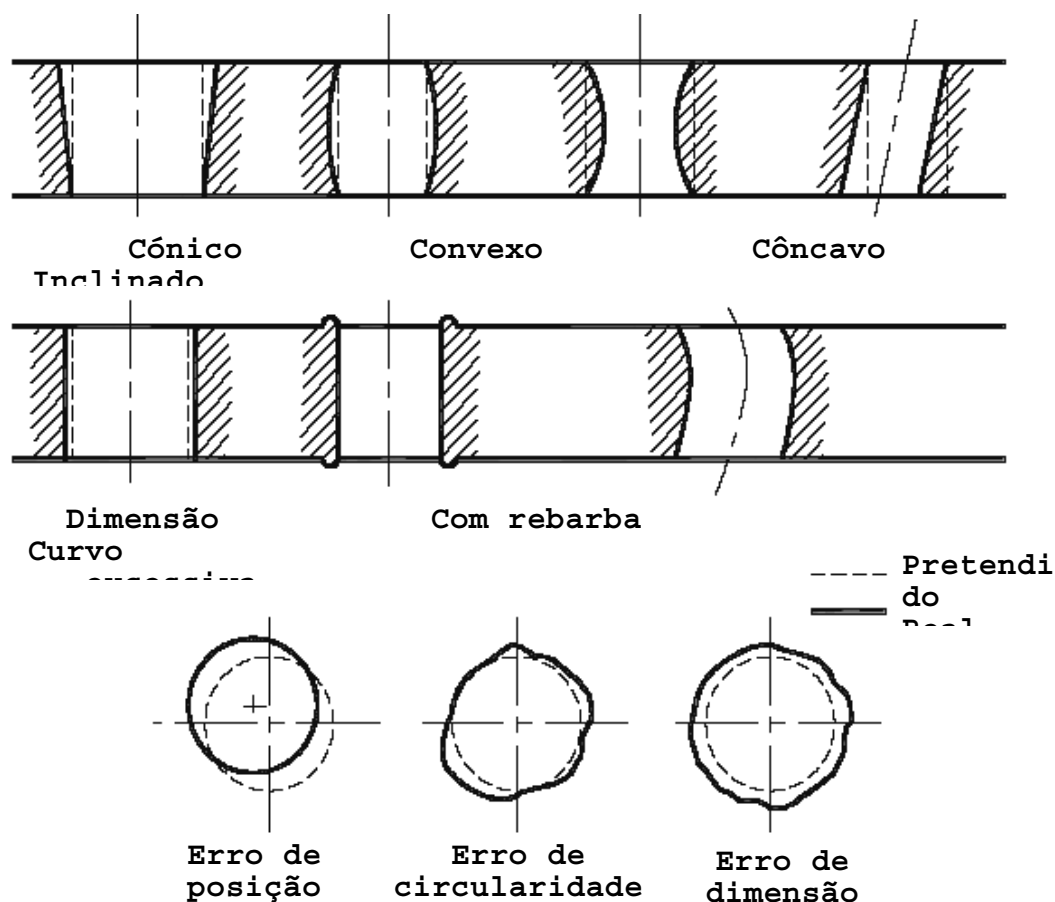


Figura 2.23 – Defeitos que ocorrem numa operação de furação

2.4 Máquinas de Furação

O processo de furação realiza-se na sua maioria em furadoras, embora seja possível a realização de furos utilizando outros processos de maquinagem. As furadoras, de um modo geral, são classificadas em quatro tipos: sensitivas, de coluna, radiais e múltiplas conforme se observa na Figura 2.24 [Kalpakjian, 1995; Groover, 1996].

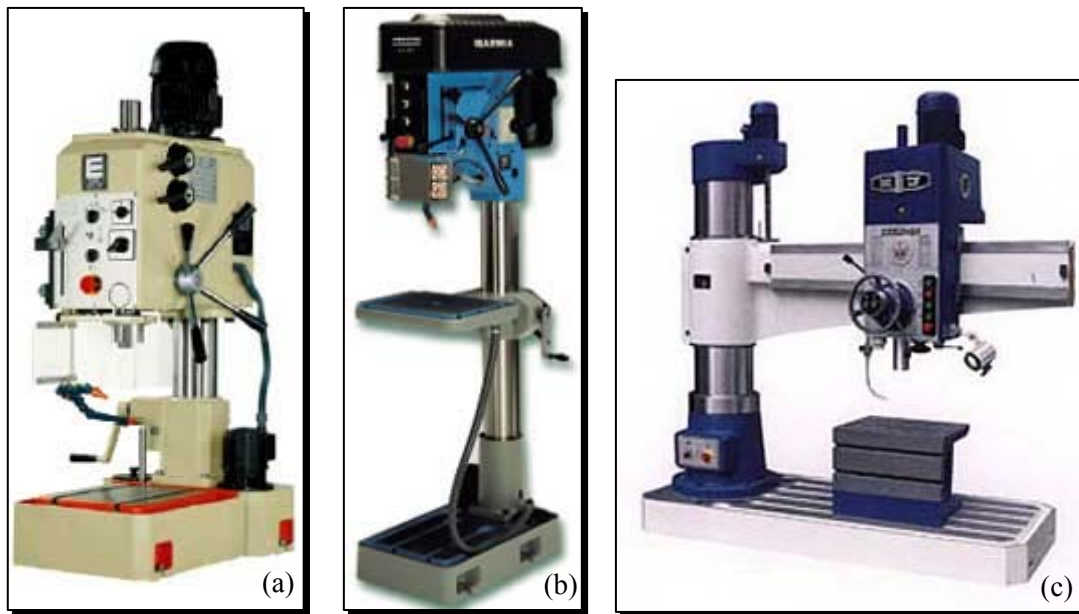


Figura 2.24 – Tipos de máquinas ferramentas (a) furadora sensitiva (b) furadora coluna (c) furadora radial¹⁷

A operação de furação numa furadora sensitiva é caracterizada pela sensibilidade do operador, isto é, o movimento de avanço/penetramento axial é efectuado manualmente através de uma alavanca. Estas furadoras permitem a realização de furos com diâmetros compreendidos entre 1 e 12mm. Relativamente às furadoras de coluna, estas dispõem de um dispositivo de avanço automático permitindo realizar furos até 35mm de diâmetro, enquanto as furadoras radiais permitem a realização de diversos furos até um diâmetro de 60mm sem necessidade de reposicionar a peça. Finalmente, as furadoras múltiplas permitem a execução de trabalhos de produção em massa, dado que permitem executar diversos furos ao mesmo tempo. As máquinas de furar caracterizam-se pelo curso da árvore, dimensões da mesa, gama de velocidades, avanços e potência que disponibilizam [Kalpakjian, 1995].

Actualmente, a operação de furação é realizada em centros de maquinagem verticais. A título de exemplo, ilustra-se na Figura 2.25 um centro de maquinagem vertical, modelo VS60, fabricado pela empresa Mori Seiki[®] dispondo de uma velocidade máxima de rotação de 12000rpm.

¹⁷ www.directindustry.com



Figura 2.25 – Centro de maquinagem vertical, Mori Seiki VS 60¹⁸

2.5 Operação de Furação

O processo de furação permite realizar, de um modo geral, três tipos de operações:

- ☐ furação (abertura do furo);
- ☐ alargamento de furos (peças com furação prévia de fundição);
- ☐ mandrilagem (correção do diâmetro).

No primeiro caso, *abertura de furo*, podem ser utilizadas brocas de diversos tipos (*broca inteira, broca de inserto, etc*). No segundo caso, *operação de alargamento de furos*, são utilizadas, preferencialmente, brocas de três e quatro arestas de corte, podendo também ser utilizadas brocas convencionais (*2 arestas de corte*). No terceiro e último caso, *operação de mandrilagem*, são utilizadas brocas especiais normalmente designadas por mandris.

Na Figura 2.26 podemos observar os tipos de operações, entre outras, possíveis de executar numa furadora.

¹⁸ www.moriseiki.co.jp – Mori Seiki, The Machine Tool Company

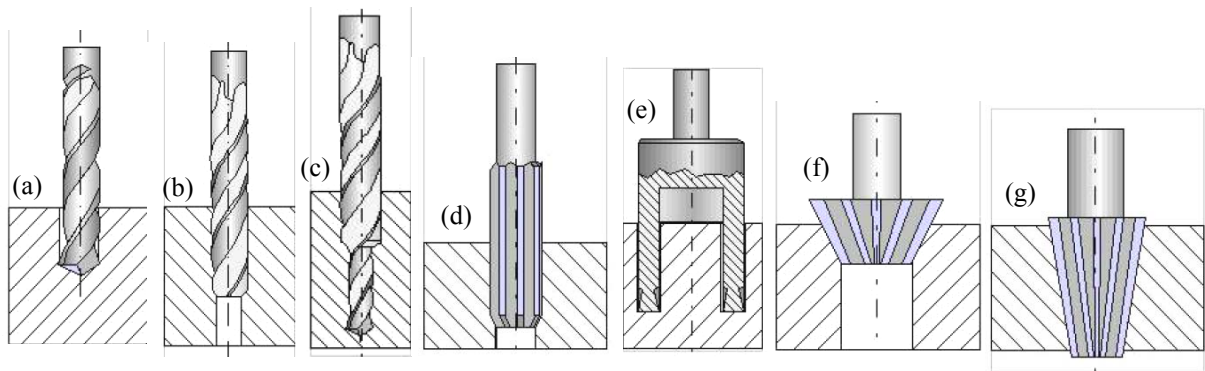


Figura 2.26 – Exemplo de algumas operações possíveis de efectuar na furadora (a) furação; (b) alargamento; (c) furação escalonada; (d) mandrilar; (e) trepanação; (f) rebaixo de perfil e (g) alargamento de perfil

Utilizando ferramentas apropriadas, consegue-se obter uma grande variedade de furos cegos, passantes, com caixas ou chanfros ou escalonados. Na Figura 2.27 são apresentadas algumas dessas geometrias.

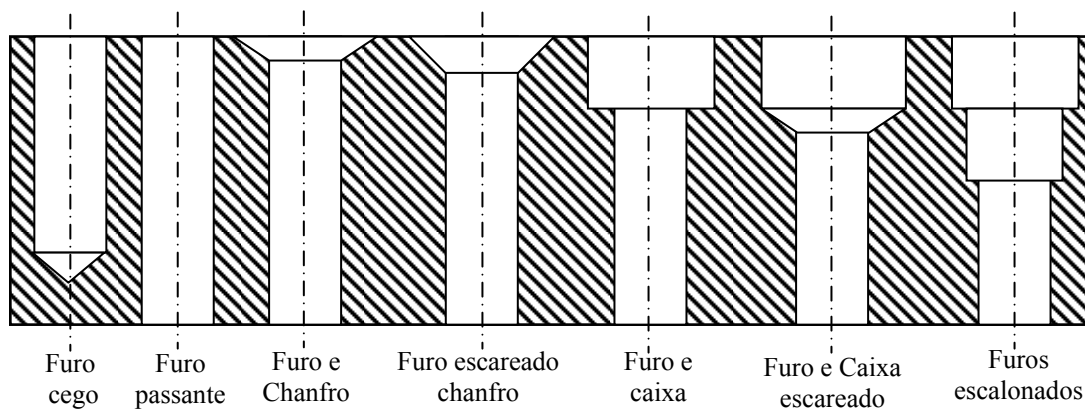


Figura 2.27 – Geometrias resultantes da operação de furação

Materiais Compósitos de Matriz Polimérica

Os materiais poliméricos tem vindo a sofrer uma enorme evolução desde o início do século XX face aos novos processos de polimerização, sendo uma das classes de material com maior desenvolvimento e implementação na actualidade. Este desenvolvimento tem conduzido ao aparecimento de produtos em grande escala no mercado, confirmado pela diversificada quantidade de produtos que nos rodeiam actualmente. Da mesma forma que os materiais tradicionais (*metais*), os materiais poliméricos tem vindo a ser estudados ao longo do tempo com vista a avaliar e a determinar o seu comportamento mecânico. No entanto, verifica-se que este é bastante mais complexo quando comparado com os materiais tradicionais, dado que estes materiais apresentam um comportamento denominado viscoelástico. Tal como os fluídos viscosos, estes fluem quando sujeitos a um determinado carregamento mas, num comportamento claramente elástico, são capazes de dissipar a energia absorvida e recuperar da sua forma quando removido o carregamento [Strong, 2000]. Face a este tipo de comportamento mecânico (*viscoelástico*), e à exigência de um bom desempenho nas mais diversas aplicações, estes materiais foram sujeitos a novos desenvolvimentos. Ao contrário do esperado, ou seja, o desenvolvimento de novos polímeros, a evolução passou pela alteração dos materiais poliméricos já existentes, através da incorporação de outros materiais denominados por reforços. O resultado desta combinação resultou na mais recente classe de materiais, os materiais compósitos poliméricos. A combinação única das propriedades físicas e químicas existentes nos materiais compósitos propiciou à sua aplicação nos mais variados ramos da indústria. Deste modo, foram criadas novas condições possibilitando a

abertura de diversas frentes de pesquisa, com o objectivo principal de avaliar o comportamento, a longo prazo, destes materiais nos diversos ambientes, bem como a sua alteração, visando a obtenção de propriedades específicas adequadas para as mais diversas aplicações. Parte da utilidade e aplicabilidade dos materiais compósitos poliméricos deve-se ao seu comportamento em meios frequentemente proibitivos para outros materiais, bem como, de algumas características base que os distinguem destes. Nas últimas décadas, os materiais compósitos têm vindo a revelar-se como a classe de material tecnológico mais interessante devido às suas propriedades, tais como, o seu baixo peso, elevada resistência mecânica e rigidez, que além de serem distintas, são bastantes superiores comparadas com as outras classes. Embora o desenvolvimento destes materiais tenha sido efectuado pelas indústrias de defesa e aeroespacial, assiste-se recentemente ao alargamento do seu uso a outras áreas.

3.1 Material Compósito - Definição

Actualmente, não existe uma definição totalmente consensual sobre materiais compósitos dado que, a palavra compósito deriva do composto, ou seja, qualquer “*coisa*” formada por constituintes diferentes.

De acordo com a comissão científica do *ASM International* presidida por *William G. Wood*, o material compósito é uma combinação de dois ou mais materiais (*reforços, matriz, enchimentos*) que diferem na forma e composição à escala macroscópica. Os constituintes permanecem com sua identidade, ou seja, não se dissolvem ou fundem completamente entre si, no entanto actuam como um único. Normalmente, os constituintes podem ser fisicamente identificados e exibem uma relação entre eles. Contudo, face às suas propriedades, a definição pode ser restrita incluindo apenas materiais que contenham reforço na forma de fibras e partículas combinados com um material ligante (*matriz*) [ASM-International, 1987]. *Leo Alting*, 1994 considera um material compósito, todos os materiais em que as propriedades intrínsecas associadas a cada constituinte (*material distinto*) foram combinadas mecanicamente. Cada constituinte retém a sua estrutura e características, no entanto após a combinação o material compósito possui melhores propriedades, nomeadamente, resistência mecânica, rigidez e baixo peso, que os constituintes. [Alting, 1994]. Os autores *Richard Flinn*, *Paul Trojan* e *Mikell P. Groover*,

consideram um material compósito a combinação de duas ou mais fases fisicamente distintas, previamente processadas, resultando num material cujas propriedades específicas são distintas de cada uma das fases, enquanto *Serope Kalpakjian*, considera como sendo uma combinação de dois ou mais fases quimicamente distintas e insolúveis, cujas propriedades e desempenho são superiores às dos constituintes actuando independentemente [*Flinn and Trojan, 1995; Kalpakjian, 1995; Groover, 1996*]. Contudo, o autor *William F. Smith*, apresenta uma definição elaborada, considerando um material compósito uma mistura ou combinação de dois ou mais micro ou macro constituintes que diferem na forma e na composição química e que, na sua essência, são insolúveis uns nos outros, enquanto *Michael Berins*, apresenta uma definição muito vaga de material compósito como sendo a combinação de uma fase contínua (*matriz*) com agentes de reforço (*fibras*) [*Berins, 1991; Smith, 1998*].

Tendo em consideração as definições anteriormente mencionadas, poderá entender-se como *material compósito* uma combinação física, numa escala microscópica, de dois ou mais constituintes (*matriz, reforço, aditivos*) distintos, que diferem na forma e composição química, mas que não se reagem entre si, cuja combinação origina um novo material com propriedades inalcançáveis por parte de um só constituinte.

3.2 Constituintes do Material Compósito

O material compósito, de um modo geral, é constituído por uma fase contínua, *matriz*, em que esta é responsável pela coesão do material, e por uma fase dispersa, vulgarmente denominada por *reforço* que promove a resistência mecânica e rigidez do material. O conhecimento das propriedades intrínsecas da matriz e reforço é fundamental para a concepção dum material compósito, dado que em função da aplicação, tanto a matriz como o reforço desempenham um papel fundamental. [*ASM-International, 1987; Chawla, 1987; Mallick, 1993; Smith, 1998*].

3.2.1 Fase contínua – Matriz

A fase contínua, *matriz*, para além de conferir a integridade física do compósito através da ligação simultânea com a fase descontínua (*reforço*), constitui uma barreira contra ambientes adversos protegendo o reforço do mecanismo de abrasão, no entanto esta

desempenha um papel secundário ao nível estrutural do compósito polimérico. A escolha da matriz polimérica dependerá das propriedades físicas, mecânicas e térmicas exigidas para uma determinada aplicação, como também do processo de fabrico escolhido e custo associado. Os materiais compósitos poliméricos podem ser constituídos por dois tipos de matriz, *matriz termoendurecível* ou *termoplástica*, sendo a maioria constituídos por uma matriz termoendurecível. A matriz termoendurecível é a mais utilizada para uso estrutural em materiais compósitos dado que, para além de apresentar inúmeras vantagens sobre a matriz termoplástica, tais como, elevada estabilidade térmica, rigidez, estabilidade dimensional, boas propriedades de isolamento térmico e eléctrico, resistência à fluência e à deformação sob carregamento, esta sofre uma cura permanente e irreversível, contrariamente ao que sucede com a matriz termoplástica [Chawla, 1987;Mallick, 1993;Smith, 1998]. As matrizes termoendurecíveis empregues na constituição dos materiais compósitos poliméricos passam essencialmente pelos poliésteres insaturados e epóxicas. A matriz de poliéster insaturado é utilizada em larga escala em compósitos de engenharia com aplicações na área automóvel, marítima e química, sendo exemplo disso os cascos e plataformas de barcos, painéis estruturais de automóveis, tubagens, tanques e condutas. A fase descontínua usualmente utilizada nesta matriz passa 90% pelas fibras de vidro. Enquanto a matriz epóxida, é a mais utilizada no fabrico de materiais compósitos avançados dado que apresenta uma elevada resistência mecânica e módulo de elasticidade. Os compósitos poliméricos reforçados com fibras de carbono, apresentam na sua maioria uma matriz epóxida, em que as fibras de carbono contribuem para as excelentes propriedades de rigidez e resistência à tracção, enquanto a matriz permite o alinhamento das fibras constituindo para a resistência ao impacto. Os compósitos de matriz epóxida apresentam, na sua maioria, uma estrutura laminar, em que esta é obtida pelo empilhamento de camadas de reforço conjuntamente com a matriz até se obter a espessura pretendida. Este tipo de estrutura é vastamente aplicado na indústria aeronáutica (asas, lemes, fuselagens), automóvel e equipamentos desportivos face à elevada percentagem de reforço em volume ($> 50\%$) [Mallick, 1993;Groover, 1996].

Na Tabela 3.1, podemos observar algumas propriedades mecânicas das principais matrizes termoendurecíveis utilizadas nos compósitos poliméricos [Chawla, 1987;Mallick, 1993;Smith, 1998].

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas das principais matrizes termoendurecíveis

Propriedades	Poliéster	Epóxida
Densidade [g/cm ³]	1.10 - 1.4	1.2 - 1.38
Resistência à tracção [MPa]	34.5 - 103.5	55 - 130
Módulo de elasticidade [GPa]	2.1 - 3.45	2.75 - 4.2
Resistência à flexão [MPa]	60 - 160	125 - 140
Resistência ao impacto [J/m]	10.6 - 21.2	5.3 - 53
Extensão [%]	1 - 5	-
Coefficiente de expansão térmica [10 ⁻⁶ /°C]	-	50 - 80
Retracção após cura [%]	5 - 12	1 - 5

3.2.2 Fase Descontínua – Reforço

A fase descontínua, usualmente conhecida por reforço, é o principal constituinte dos materiais compósitos poliméricos dado que, para além de ocupar a maior fracção volumétrica do material compósito, confere excelentes propriedades mecânicas e térmicas dos materiais compósitos. A título de exemplo, um componente que contenha uma fracção volumétrica de 60% de fibras de carbono contínuas, orientadas numa direcção, pode apresentar uma tensão de rotura à tracção de 900MPa e um módulo de elasticidade de 300GPa, enquanto o mesmo material polimérico sem reforço apresenta uma tensão de cedência de 60MPa e um módulo de elasticidade de 3GPa [Strong, 2000]. Verifica-se que a presença de um material de reforço apresenta influência directa nas propriedades do compósito, melhorando-as de uma forma significativa. Deste modo, a selecção adequada do reforço, nomeadamente, o tipo (*material, forma, comprimento*), a percentagem volúmica e a orientação, é extremamente importante visto que influencia as propriedades mecânicas e térmicas do material compósito sendo elas [Mallick, 1993; Kalpakjian, 1995]:

- ❑ densidade;
- ❑ resistência à tracção e compressão;
- ❑ módulo de elasticidade;

- ☐ resistência à fadiga;
- ☐ resistência à corrosão;
- ☐ tenacidade à fractura;
- ☐ condutividade térmica.

No que respeita ao tipo de reforço, este apresenta-se na maioria dos casos sob a forma de fibra com secção circular, apresentando diâmetros entre 10 e 130 μm , podendo no entanto, apresentar-se também na forma de partícula. A geometria do reforço é um dos principais parâmetros a ser considerado, visto que as propriedades mecânicas destes materiais dependem da forma e das dimensões do reforço. A título de exemplo, o diâmetro do reforço é um factor extremamente significativo nas suas propriedades mecânicas, particularmente na tensão de rotura à tracção, conforme podemos observar na Figura 3.1 [Chawla, 1987; Mallick, 1993; Groover, 1996].

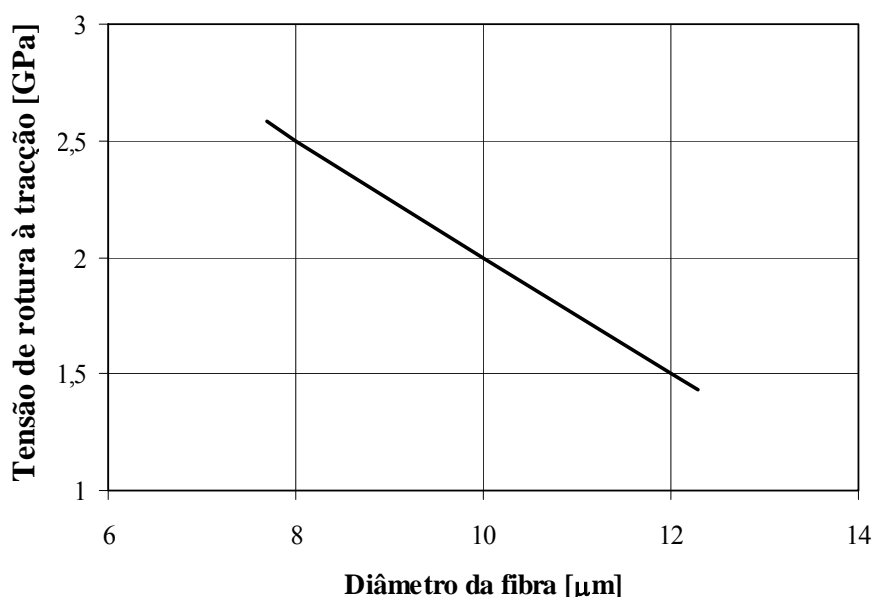


Figura 3.1 – Relação entre a tensão de rotura à tracção e o diâmetro do reforço [Chawla, 1987]

Através da Figura 3.1, podemos observar que a diminuição do diâmetro do reforço, conduz a um aumento da sua tensão de rotura à tracção, por conseguinte a do material compósito, dado que quanto menor o diâmetro menor a probabilidade de defeitos na sua estrutura, e o material encontra-se orientado segundo o eixo do reforço.

No mercado existem três tipos predominantes de materiais de reforço, o vidro, carbono e kevlar, sendo o reforço em vidro o mais comum nos materiais compósitos, o qual vem a ser utilizado desde 1920. As fibras de vidro são, de longe, as mais utilizadas face ao seu custo, enquanto as fibras de carbono e aramida são empregues em aplicações que exigem elevado desempenho, caso da indústria aeronáutica e aeroespacial, devido à sua elevada resistência mecânica, módulo de elasticidade e baixa densidade [Mallick, 1993; Groover, 1996].

Na Tabela 3.2, é possível observar algumas propriedades mecânicas e térmicas dos principais materiais de reforço (*fibra*) [ASM-International, 1987; Chawla, 1987; Mallick, 1993; Flinn and Trojan, 1995; Smith, 1998; Shackelford, 2000].

Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas e térmicas dos principais materiais de reforço.

Fibra	Diâmetro [μm]	Densidade [g/cm^3]	Tensão de Rotura à Tracção [GPa]	Módulo Elástico [GPa]	Coefficiente de Expansão Térmica [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]
Vidro	10	2.54 - 2.62	1.75 - 4.48	69 - 86	4.7 - 5.4
Carbono	7 - 10	1.76 - 1.9	2.30 - 3.65	207 - 400	-0.54 – -0.6
Kevlar	12	1.45 - 1.47	2.76 - 3.62	83 - 186	-2

O reforço, para além de se apresentar sob a forma de fibra pode ser contínuo (*fibras longas*) ou descontínuo (*fibras curtas*). O reforço contínuo apresenta comprimentos superiores a 100mm possuindo um rácio comprimento/diâmetro compreendido entre 200 e 500, e é particularmente utilizado no fabrico de compósitos avançados. Enquanto o reforço descontínuo apresenta um comprimento compreendido entre 10 e 100mm, (rácio comprimento/diâmetro compreendido entre 20 e 60), frequentemente utilizado no fabrico de compósitos de engenharia. A forma usual de distinguir o reforço, contínuo ou descontínuo, passa pelas suas propriedades mecânicas, isto é, se as propriedades do reforço melhorarem em função do comprimento, é considerado reforço descontínuo. Quando não existe melhorias nas propriedades, então o reforço é considerado contínuo. As fibras denominadas “*whiskers*” são um caso particular do reforço descontínuo, dado que apresentam um comprimento de 5mm e diâmetros compreendidos entre 1 e 10 μm [ASM-International, 1987; Flinn and Trojan, 1995; Kalpakjian, 1995; Groover, 1996].

A percentagem volúmica de reforço é outro aspecto fundamental, visto que as propriedades mecânicas variam em função desta (Figura 3.2). Verifica-se, no entanto, que a percentagem volúmica utilizada para reforçar os materiais poliméricos varia entre 10 e 65%, visto que acima deste valor as propriedades dos materiais compósitos tendem a diminuir. Através da Figura 3.2, observa-se que o aumento da percentagem volúmica de reforço conduz a um aumento das propriedades mecânicas do material compósito. Verifica-se também que o tipo de reforço, nomeadamente o seu comprimento, apresenta influência nas propriedades, visto que a utilização de reforço contínuo (*fibras longas*) confere propriedades superiores às obtidas com o reforço descontínuo (*fibras curtas*) [Flinn and Trojan, 1995; Kalpakjian, 1995].

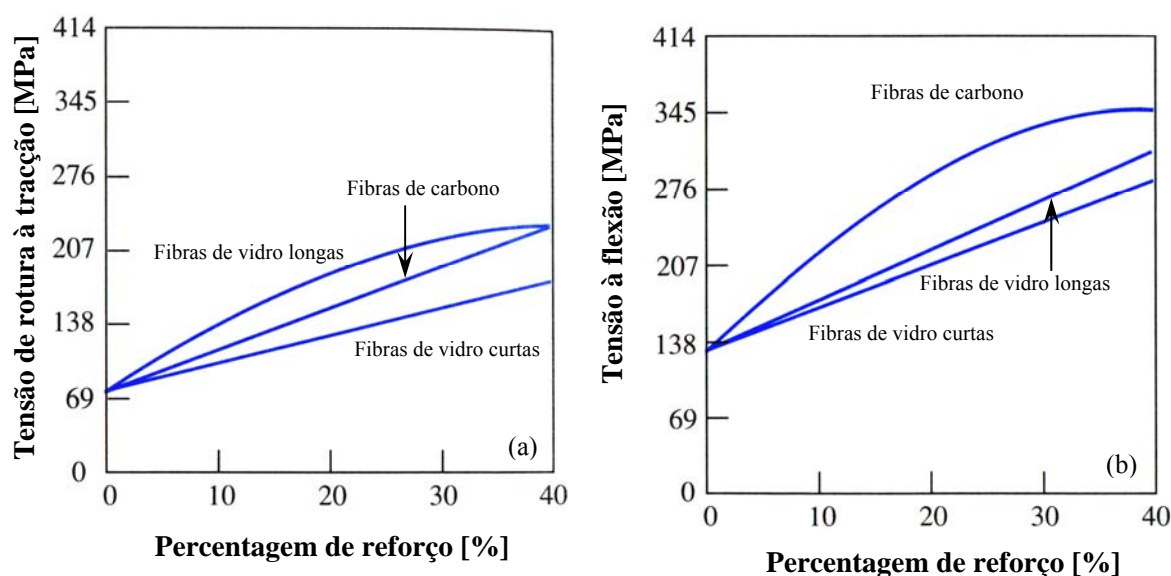


Figura 3.2 – Efeito da percentagem volúmica de reforço nas propriedades mecânicas (a) tensão de rotura à tracção e (b) tensão à flexão do material compósito [Flinn and Trojan, 1995]

A orientação do reforço é outro aspecto importante, dado que apresenta influência directa nas propriedades do material compósito conforme se observa na Figura 3.3.

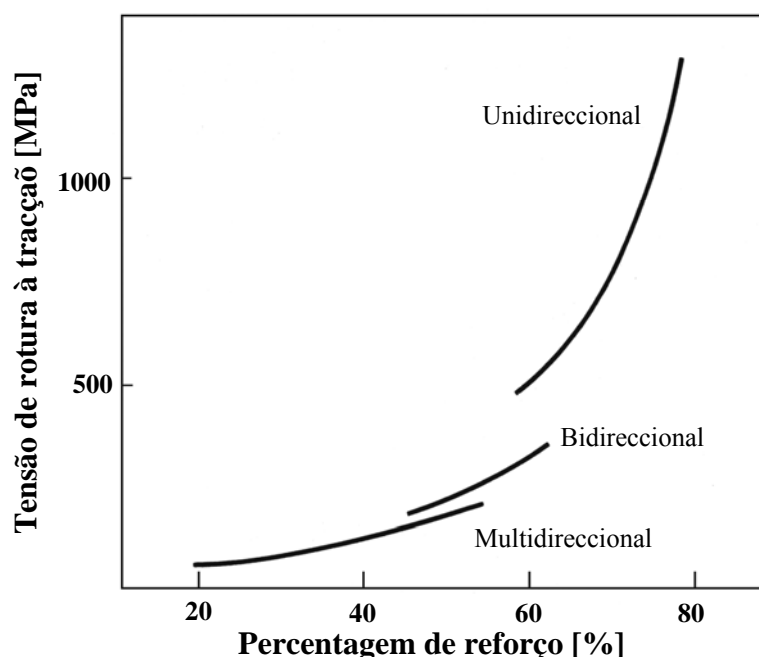


Figura 3.3 – Influência da orientação e percentagem de reforço na tensão de rotura à tracção [Kalpakjian, 1995]

Verifica-se que a tensão de rotura à tracção do material compósito apresenta valores máximos segundo a direcção longitudinal (*orientação unidireccional*), independentemente da percentagem de reforço, querendo isto dizer que o material compósito é anisotrópico, conduzindo por sua vez a uma anisotropia de outras propriedades, tais como o módulo elástico, a condutibilidade térmica e eléctrica e o coeficiente de expansão térmica. Verifica-se também que o aumento da percentagem de reforço propicia a um aumento significativo da tensão de rotura à tracção para a orientação unidireccional. [ASM-International, 1987; Flinn and Trojan, 1995; Kalpakjian, 1995; Groover, 1996]

Em função da aplicação, a orientação do reforço é fundamental, dado que possibilita ao material compósito apresentar bom desempenho numa ou em mais do que uma direcção. Através de métodos de fabrico apropriados, a orientação das fibras é cuidadosamente controlada de forma a conferir ao material compósito as propriedades mecânicas pretendidas em qualquer direcção ou combinação de diferentes direcções.

Deste modo, a orientação do reforço no material compósito pode ser unidireccional, bidireccional e multidireccional, conforme se observa na Figura 3.4 [Groover, 1996; Shackelford, 2000]. A orientação unidireccional implica a colocação do reforço no

material compósito segundo uma direcção preferencial, obtendo-se desta forma valores de resistência mecânica e rigidez do material compósito máximos segundo a direcção do reforço. Enquanto a orientação bidireccional e multidireccional implica a colocação do reforço em duas e diversas direcções respectivamente, conduzindo a que o material compósito com orientação multidireccional possua propriedades quase isotrópicas.

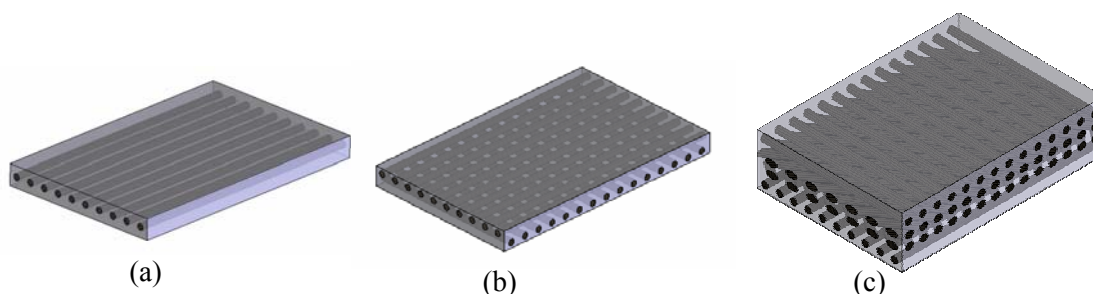


Figura 3.4 – Classificação da orientação do reforço num material compósito (a) unidireccional (b) bidireccional e (c) multidireccional

Tendo em consideração que as propriedades mecânicas e térmicas dos materiais compósitos poliméricos estão fortemente dependentes das propriedades do material de reforço, é efectuada uma breve descrição dos principais materiais utilizados como reforço, nomeadamente o vidro, carbono e o kevlar.

3.2.2.1. Fibra de Vidro

A fibra de vidro é o reforço mais utilizado pelos diversos fabricantes na concepção dos materiais compósitos poliméricos estruturais, face ao seu baixo custo de fabrico. A percentagem volúmica de reforço usualmente utilizada encontra-se compreendida entre 30 e 60%, na qual apresenta as seguintes características [Kalpakjian, 1995; Smith, 1998]:

- ☐ elevado rácio resistência/peso;
- ☐ boa estabilidade dimensional;
- ☐ boa resistência ao calor, às baixas temperaturas e à corrosão;
- ☐ boas propriedades de isolamento;
- ☐ facilidade de fabrico a um custo reduzido;
- ☐ elevada resistência química.

A fibra de vidro em função da sua aplicação pode apresentar diversas composições, no entanto, existem duas classes vastamente utilizadas no reforço dos materiais poliméricos, a classe *E* e *S*. Na Tabela 3.3, apresenta-se a composição química das classes de fibras de vidro mais utilizadas como reforço em materiais compósitos poliméricos [ASM-International, 1987;Chawla, 1987;Mallick, 1993;Smith, 1998]. A classe E, constituída por boro-silicato, alumínio e cálcio, é vastamente utilizada na obtenção de fibras contínuas devido ao seu baixo custo de fabrico, conduzindo à sua aplicação em grande parte dos materiais compósitos poliméricos. Apresenta valores médios de tensão de rotura à tracção e módulo de elasticidade médio de 3.45 e 73GPa, respectivamente. A classe S, originalmente desenvolvida para aplicações militares e aeroespaciais, para além de apresentar uma tensão de rotura à tracção superior à classe E, apresenta o valor da tensão de rotura à tracção mais elevado entre as restantes fibras, sejam fibras de carbono ou de kevlar (Tabela 3.4).

Tabela 3.3 – Composição química das classes de fibras de vidro utilizadas nos materiais compósitos poliméricos

Composição Química [wt%]	Classe E	Classe S
SiO ₂	52 - 56	65
Al ₂ O ₃	12 - 16	25
CaO	16 - 25	-
MgO	0 - 5	10
B ₂ O ₃	5 - 13	-
Na ₂ O	0 - 2	-

No entanto, face à sua composição química e ao seu custo de fabrico, esta torna-se mais dispendiosa que a classe E. Num passado recente, foi concebida e disponibilizada no mercado uma versão mais barata da classe S, denominada por *classe S2*. Embora esta apresente propriedades semelhantes à classe original, a sua aplicação não é restrita a aplicações militares e aeroespaciais como acontece com a classe S. Através da Tabela 3.4, podemos verificar que as fibras de vidro para além de apresentarem propriedades mecânicas inferiores apresentam uma densidade superior comparativamente com as restantes fibras. Contudo, face à sua versatilidade e baixo custo de fabrico, a fibra de vidro

é o reforço mais utilizado para reforçar aos materiais poliméricos [ASM-International, 1987;Mallick, 1993;Groover, 1996;Smith, 1998].

Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas das fibras de vidro utilizadas nos materiais compósitos poliméricos

Tipo de fibra		Diâmetro [μm]	Tensão de Ruptura à Tração [MPa]	Módulo elástico [GPa]
Vidro	classe E	10	3450	73
	classe S	10	4460	87
Carbono		10	3100	240
Kevlar 49		12	3450	130

As fibras de vidro obtidas através da trefilagem de monofilamentos de vidro, podem apresentar-se em diversas formas como produto final, fio único (*strand*), multifio (*roving*) e manta ou tecido (*woven fabrics*) conforme se observa na Figura 3.5. [Chawla, 1987;Mallick, 1993;Smith, 1998].



Figura 3.5 – Fibra de vidro na forma de produto final¹⁹

Os materiais compósitos reforçados a fibra de vidro, usualmente denominados por plásticos reforçados a fibra de vidro (PRFV), são vastamente aplicados na indústria aeroespacial, aeronáutica, marítima, química e transportadora. Os tanques de reserva, condutas, cascos e plataformas de barcos, carroçaria de automóveis são alguns exemplos

¹⁹ www.dxfiber.com/fiberglass.htm

da aplicação dos plásticos reforçados a fibras de vidro. Contudo, a recente introdução das fibras de kevlar no mercado, conduziu à substituição destas fibras em algumas aplicações face às excelentes propriedades e elevado desempenho que possuem.

3.2.2.2. Fibras de Carbono

As fibras de carbono, por sua vez, são caracterizadas por apresentarem valores muito elevados de resistência e módulo de elasticidade (*elevada rigidez*) conjuntamente com uma densidade baixa. Por esta razão, os compósitos de fibras de carbono estão a substituir os materiais convencionais em diversas aplicações, como aeronáutica e aeroespacial em que a redução de peso é um factor extremamente fundamental. No entanto, face ao seu elevado custo, estas apresentam campos de aplicação muito restritos, *aeroespacial* e *aeronáutica*, conduzindo a uma utilização limitada em diversas indústrias, sendo exemplo disso a indústria automóvel [Chawla, 1987;Smith, 1998].

Estas fibras podem apresentar módulos elásticos que variam entre 207 e 1000GPa, sendo denominadas por fibras de baixo e elevado módulo elástico, respectivamente. As fibras de carbono com elevado módulo elástico são obtidas através da *carbonização* das fibras do material precursor, seguido do processo de *grafitização* a elevadas temperaturas (1800-2500°C), enquanto as fibras de baixo módulo elástico apenas sofrem o processo de *carbonização* a uma temperatura compreendida entre 500 e 1500°C. É de notar que ambas as fibras, baixo e elevado módulo elástico, passam previamente pelo processo de *estabilização*, em que as fibras do material precursor são tracionadas e posteriormente oxidadas ao ar a uma temperatura compreendida entre 200 e 220°C (Figura 3.6). Em geral, as fibras de baixo módulo elástico apresentam tensões de rotura à tracção e à compressão superiores às fibras de elevado módulo elástico dado que o processo de grafitização conduz a uma diminuição da resistência à tracção [Chawla, 1987;Smith, 1998].

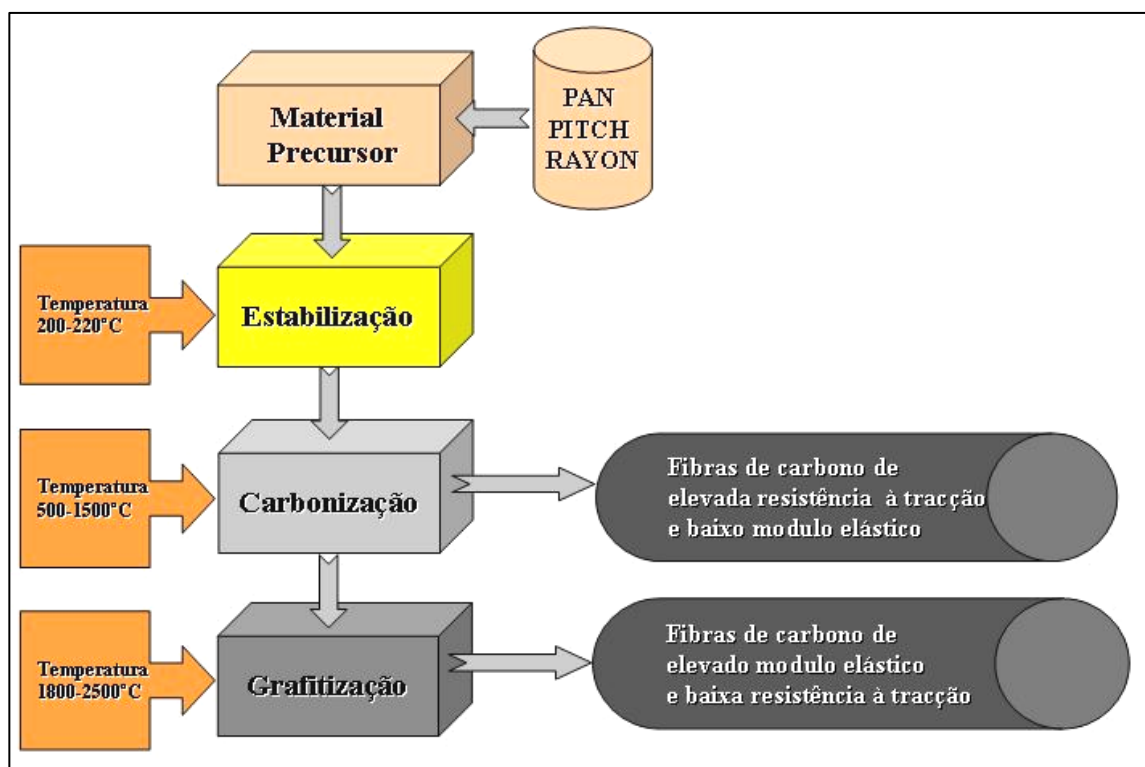


Figura 3.6 – Processo de fabrico das fibras de carbono

Comercialmente as fibras de carbono podem ser obtidas através de três percursos, o poliacrilonitrilo (PAN – polyacrylonitrile), o “rayon” (polímero termoendurecível) e o “pitch”, um resíduo da destilação do petróleo ou alcatrão. As fibras, em geral, são obtidas através do precursor poliacrilonitrilo e apresentam uma resistência à tracção e um módulo de elasticidade que variam entre 2.34 e 3.17GPa e 193 e 413GPa, respectivamente. A densidade das fibras de carbono, embora sejam dependentes do material precursor e dos tratamentos térmicos sofridos, apresentam valores numa gama de 1.6 a 2.2g/cm³ com um diâmetro compreendido entre 7 e 10µm. Na Tabela 3.5 apresentam-se as propriedades mecânicas e térmicas das fibras de carbono mais utilizadas como reforço de materiais poliméricos termoendurecíveis [ASM-International, 1987;Chawla, 1987;Mallick, 1993;Smith, 1998].

Tabela 3.5 – Propriedades mecânicas das fibras de carbono utilizadas nos materiais compósitos poliméricos

Propriedades	PAN		Pieth		Rayon
	LM	HM	LM	HM	
Densidade [g/cm ³]	1.76	1.9	1.9	2	1.66
Diâmetro da fibra [μm]	7 - 8	7	11	10	8.5
Tensão de rotura à tracção [GPa]	3.3	2.4	1.4	1.7	1
Módulo de elasticidade [GPa]	230	390	160	380	390
Extensão [%]	1.4	0.6	0.9	0.4	2.5
Condutividade Térmica [W/m]	8.5	70	--	100	--
Coefficiente de expansão térmica [10 ⁻⁶ /K]	-0.7	-0.5	--	-0.9	--

PAN - poliacrilonitrilo; LM - baixo módulo de elasticidade; HM - elevado módulo de elasticidade

3.2.2.3. Fibras de Aramida

As fibras de aramida, comercialmente conhecidas como fibras de Kevlar, foram introduzidas em 1972 pela companhia *Du Pont*[®], e até a data existem dois tipos de fibras, o Kevlar 29[®] e o Kevlar 49[®]. O primeiro tipo é uma fibra de elevada resistência mecânica e baixa densidade, concebida para determinadas aplicações como cordas, cabos e sobretudo para protecção balística. O segundo, por sua vez, é caracterizado por possuir uma elevada resistência mecânica, um elevado módulo de elasticidade e uma densidade reduzida. Estas propriedades fazem com que as suas fibras sejam bastante utilizadas como reforço de matrizes poliméricas, em compósitos com aplicações na indústria aeroespacial, marítima e automóvel. As fibras de aramida (Kevlar) possuem a densidade mais baixa e o rácio resistência / peso mais elevado entre as restantes fibras mencionadas, no qual estas são vastamente empregues em aplicações que exijam elevada resistência mecânica, rigidez, resistência à fadiga e baixo peso, tendo como principais aplicações a área aeroespacial e militar, nomeadamente em coletes à prova de bala, e diversos componentes estruturais do vaivém espacial [Mallick, 1993].

Na Tabela 3.6 apresentam-se algumas propriedades mecânicas dos tipos de fibras de aramida, Kevlar 29[®] e Kevlar 49[®] [ASM-International, 1987; Chawla, 1987].

Tabela 3.6 – Propriedades mecânicas das fibras de aramida, Kevlar 29® e Kevlar 49®

Propriedades	Kevlar 29®	Kevlar 49®
Densidade [g/cm ³]	1.44	1.44
Tensão de rotura à tracção [GPa]	2.8 - 3.6	3.6 - 4.1
Módulo de elasticidade [GPa]	65 - 83	125 - 131
Extensão [%]	2.8 - 4	1.8 - 2.8

3.3 Compósitos de Matriz Polimérica

Os materiais compósitos de matriz polimérica para além, de representarem 90% da classe dos materiais compósitos, apresentam um enorme interesse em diversas aplicações na engenharia moderna em virtude das suas excelentes propriedades. Os compósitos de matriz polimérica são considerados materiais de engenharia e do futuro, dado que apresentam excelentes propriedades, entre elas [Chawla, 1987;Groover, 1996]:

- ☐ elevado rácio resistência/peso;
- ☐ elevado rácio modulo de elasticidade/ peso;
- ☐ baixa densidade;
- ☐ boa resistência à fadiga;
- ☐ boa resistência à corrosão;
- ☐ baixa expansão térmica conduzindo a boa estabilidade dimensional.

Na Tabela 3.7, podemos observar as propriedades mecânicas dos principais compósitos de matriz polimérica [Chawla, 1987;Mallick, 1993;Groover, 1996].

Tabela 3.7 – Propriedades mecânicas dos principais compósitos de matriz polimérica

Compósito Polimérico		Densidade [g/cm ³]	Tensão de rotura à tracção [MPa]	Módulo elástico [GPa]
Matriz	Reforço			
Poliéster	Fibra de vidro (E)	1.5	205	69
Epóxida	Fibra de carbono de elevada resistência (unidireccional)	1.55	1500	140
Epóxida	Fibra de carbono de elevado modulo elástico (unidireccional)	1.63	1240	215
Epóxida	Fibra de carbono (quase-isotropica)	1.55	579	45.5
Epóxida	Fibra de kevlar (unidirectional)	1.4	1380	76
Epóxida	Fibra de vidro (E)	1.85	965	40

A maioria dos compósitos de matriz polimérica oferece uma combinação entre o módulo elástico e a resistência mecânica semelhante ou superior à maioria dos materiais convencionais (*metálicos*). No entanto, devido à sua baixa densidade, aos rácios resistência/peso e resistência/módulo elástico, à elevada resistência à fadiga e corrosão estes materiais encontram-se numa posição superior aos materiais metálicos. Com base nas suas propriedades, os materiais compósitos poliméricos são considerados a classe numero um (1) dos materiais estruturais, que tem vindo a substituir componentes críticos de materiais convencionais em diversas áreas, como a aeroespacial, aeronáutica, automóvel entre outras. Contudo, as propriedades mecânicas dos materiais compósitos poliméricos dependem fortemente da direcção das fibras, contrariamente ao que acontece com os materiais metálicos convencionais, em que estes são considerados isotrópicos. A título de exemplo, a resistência à tracção e o módulo de elasticidade de um compósito unidireccional (*fibras*), apresentam valores máximos na direcção longitudinal das fibras e valores mínimos na direcção perpendicular às fibras. A concepção dos materiais compósitos poliméricos é considerada um processo difícil de obter, comparativamente com os metais, face à diferença existente das propriedades nas diferentes direcções. No entanto, face à anisotropia natural dos materiais compósitos poliméricos é possível tirar partido da

situação e conjugar as propriedades desejadas de acordo com o pretendido [Mallick, 1993; Groover, 1996].

Por sua vez, estes materiais encontram-se normalmente divididos em dois grupos, os *compósitos avançados* e os *compósitos de engenharia*, diferenciando entre eles o tipo de matriz polimérica e reforço (*dimensão da fibra*) utilizado, Figura 3.7.

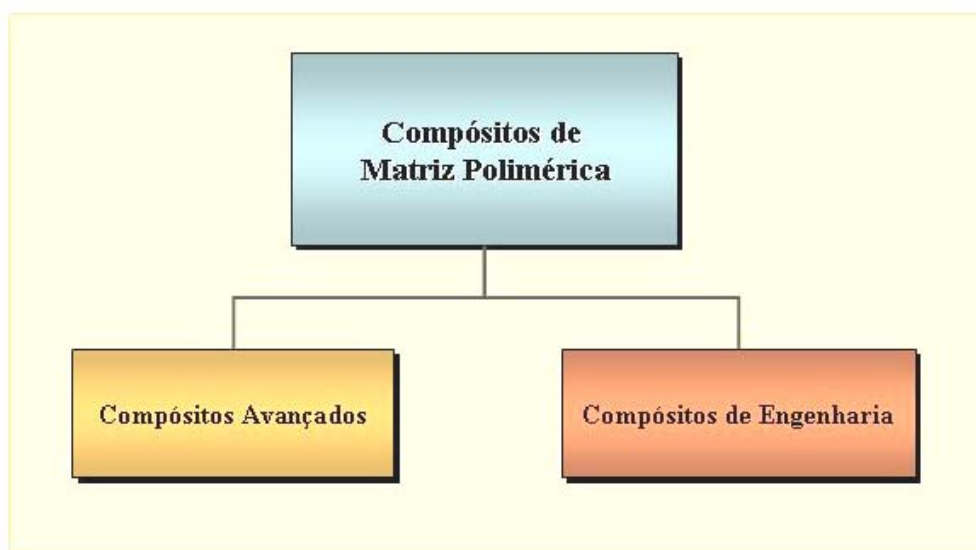


Figura 3.7 – Classificação dos materiais compósitos de matriz polimérica

Os compósitos avançados são caracterizados pelo seu elevado desempenho, preço e utilização de reforços contínuos (*fibras longas de carbono, boro e kevlar*), sendo particularmente empregues em aplicações aeroespaciais e aeronáuticas (motores de caixa de propulsão, partes estruturais (*flaps, lemes, asas*)) de aviões/helicópteros comerciais e militares, Figura 3.8.



Figura 3.8 – Exemplos de aplicações dos compósitos avançados na indústria aeroespacial e aeronáutica (a) nave espacial X33 (b) avião comercial “Beech Starship 2000” (c) avião comercial “Boeing 757-200”²⁰

No entanto, face ao contínuo desenvolvimento dos processos de fabrico, hoje em dia, podem ser empregues em componentes estruturais da indústria automóvel (*monocoques, chassis e carroçaria*) e equipamentos desportivos que exijam elevado desempenho, nomeadamente, tacos de golfe, raquetes de ténis, arcos e flechas, esquis, kayaks, pranchas de surf e bicicletas, assim, como num crescente número de componentes que requeiram um elevado rácio resistência/peso, sendo a característica principal destes materiais [Mallick, 1993; Alting, 1994; Flinn and Trojan, 1995; Groover, 1996; Shackelford, 2000].

A título de exemplo, o *McLaren F1* datado de 1993, foi o primeiro carro de produção em série a apresentar o monocoque e a estrutura da carroçaria em material compósito reforçado a fibra de carbono conforme se observa pela Figura 3.9.

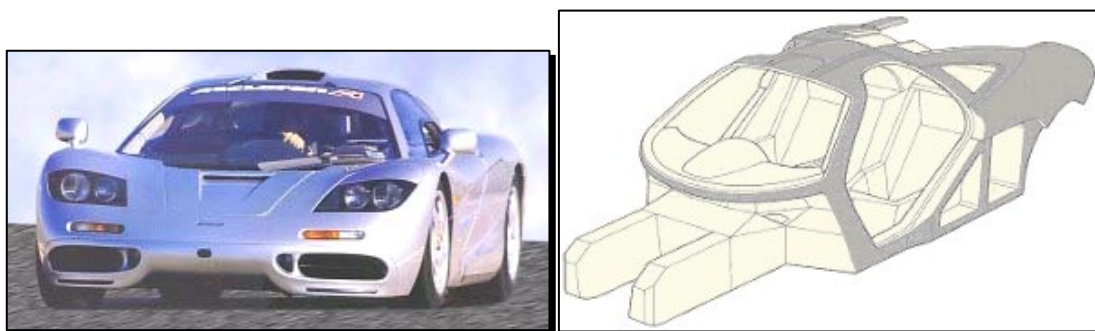


Figura 3.9 – Monocoque e carroçaria do McLaren F1 em material compósito reforçado a fibra de carbono²¹

Passados três anos a *Ferrari* apresentou o modelo *F50* constituído pelo monocoque e a estrutura da carroçaria conjuntamente com as portas no mesmo material compósito. Actualmente, o *Porsche Carrera GT* e o *Mercedes SLR*, também apresentam o monocoque

²⁰ <http://www.nasa.gov>; <http://www.galleriaaeronautica.it>

²¹ http://www.autozine.org/technical_school/chassis.htm

e a carroçaria em material compósito reforçado a fibras de carbono, enquanto o BMW M3 CSL apresenta uma parte estrutural da carroçaria, o tejadilho (Figura 3.10).



Figura 3.10 – (a) Monocoque do Porsche Carrera GT, (b) Tejadilho do BMW M3 CSL e (c) carroçaria do Mercedes Benz - SLR em plástico reforçado a fibra de carbono (PRFC)²²

Actualmente, estes materiais são vastamente utilizados em engenharia civil, mais concretamente em pilares de pontes (*envolvendo o pilar*) como forma de protecção à corrosão e melhoramentos desses mesmos pilares em resposta aos sismos.

Os compósitos de engenharia por sua vez, são caracterizados por um menor desempenho, comparativamente com os compósitos avançados, face ao tipo de reforço (*fibras curtas*) e matriz utilizadas, conduzindo a propriedades mecânicas mais baixas. As aplicações destes compósitos incluem cascos de barcos, canoas, tubos, componentes não estruturais de automóveis, painéis de construção e reservatórios de combustível. Regra geral, os compósitos de engenharia são considerados materiais compósitos que contenham fibras curtas como reforço [Mallick, 1993; Flinn and Trojan, 1995; Groover, 1996; Shackelford, 2000].

²² <http://www.porsche.com>; <http://www.bmw.com>; <http://www.mercedes-benz.com>

Furação de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica

O elevado crescimento dos materiais compósitos de matriz polimérica face às novas tecnologias de produção, tem exigido por parte da indústria aeroespacial bem como de outras indústrias, um enorme esforço para incorporar os materiais compósitos em componentes e estruturas técnicas [Ramulu et al., 2001; Kim and Ramulu, 2004]. Esta incorporação de materiais compósitos deve-se às suas excelentes propriedades: *elevada resistência mecânica, rigidez e baixa densidade* [Swartz, 1996; Jahanmir et al., 1999; Mathew et al., 1999a, 1999b; Velayudham et al., 2005]. No entanto, a maquinagem destes materiais é bastante complexa devido à sua heterogeneidade, anisotropia, sensibilidade ao calor e ao facto de os reforços serem extremamente abrasivos. É importante compreender que a maquinagem dos materiais compósitos é fortemente determinada pelas propriedades mecânicas e térmicas da matriz e reforço, pela percentagem, tipo e orientação do reforço (*fibras*). As propriedades específicas do material compósito, como a anisotropia e a heterogeneidade, entre outras, devem ser levadas em consideração durante a operação de maquinagem, dado que estas são preponderantes para o bom desempenho do material quando sujeito ao corte. A título de exemplo, citam-se as seguintes:

- ❑ diferentes coeficientes de expansão térmica do reforço (*fibra*) e da matriz podem conduzir a tensões internas após a cura, que posteriormente se reflectem durante a maquinagem conduzindo à deformação e danos nos materiais.

- ❑ baixa resistência interlaminar induz danos tais como delaminação, durante a maquinagem. O problema é tanto mais significativo quanto maior a unidirecionalidade dos materiais, já que a sua resistência é menor na direcção perpendicular à fibra.
- ❑ a combinação da estrutura heterogénea com a alta resistência coesiva do reforço (*fibras*) conduz a um excessivo desgaste da ferramenta durante a maquinagem.

A operação de furação é o processo mais aplicado na maquinagem de materiais compósitos devido à necessidade de integração estrutural, ou seja, ligação mecânica entre os diversos componentes por intermédio de parafuso ou rebite [Lin and Chen, 1996; Tsao and Chen, 1997; Lachaud et al., 2001; Zhang et al., 2001a; Zhang et al., 2001b; Davim and Reis, 2003b; Hocheng and Tsao, 2003; El-Sonbaty et al., 2004; Ramkumar et al., 2004; Langella et al., 2005; Velayudham et al., 2005]. A utilização destes materiais em componentes estruturais tem permitido uma redução significativa de peso e uma melhoria das suas características dinâmicas, em diversas áreas, nomeadamente, na indústria aeronáutica, aeroespacial, automóvel, entre outras. A título de exemplo, a estrutura de um avião comercial possui cerca de 100 000 furos em que 50% do custo de produção se encontra ligado à montagem dos diversos componentes da estrutura.

Porém, a operação de furação em materiais compósitos apresenta um comportamento distinto da furação de materiais metálicos, tornando-se importante a sua avaliação. As brocas helicoidais usualmente utilizadas em materiais metálicos não são de todo indicadas para a execução de furos em materiais compósitos, visto que estas causam inúmeros defeitos, frequentemente verificados durante a execução de furos em componentes estruturais integrantes de aeronaves [Adams, 1996; Lachaud et al., 2001; Velayudham et al., 2005]. No entanto, embora seja prática corrente a utilização de processos tradicionais de maquinagem, estes devem ser adaptados de forma a reduzir a geração de dano por meios mecânicos ou térmicos nesta nova classe de materiais. Deste modo, assiste-se a alterações na geometria e materiais das ferramentas de corte, assim como nas condições operacionais da maquinagem com o intuito de obter bons resultados, dano mínimo e bom do

acabamento de superfície e precisão dimensional. Contudo, a execução de furos em materiais compósitos requer um cuidado especial face à sua natureza, *heterogeneidade e anisotropia*, no qual induz a defeitos específicos durante a operação de furação, reflectindo-se de uma forma directa na resistência do material quer a solicitações estáticas quer dinâmicas (*fadiga*). A delaminação é o defeito mais preocupante, visto que para além de conduzir a uma fraca tolerância na montagem dos componentes, conduz a uma diminuição da resistência do material, originando o colapso prematuro das estruturas em serviço [Koenig et al., 1985; Di Llio et al., 1992; Hocheng et al., 1992; Komanduri, 1993; Mander and Bhattacharyya, 1993; Caprino and Tagliaferri, 1995; Lin and Chen, 1996; Persson et al., 1997a; Persson et al., 1997b; Zhang et al., 2001a; El-Sonbaty et al., 2004; Ramkumar et al., 2004; Xu et al., 2004].

Com o intuito de minimizar o defeito de delaminação, a operação de furação de materiais compósitos têm sofrido um enorme desenvolvimento por parte de inúmeros investigadores [Koenig and Grass, 1989; Malhotra, 1990; Hocheng and Puw, 1992; Chambers and Bishop, 1995; Lin and Chen, 1996; Chen, 1997; Mathew et al., 1999a, 1999b; Upadhyay and Lyons, 1999; Piquet et al., 2000; Ramulu et al., 2001; Won and Dharan, 2002b; Davim and Reis, 2003a, 2003b; Tsao and Hocheng, 2003; Bhatnagar et al., 2004a; Davim et al., 2004b, 2004a; El-Sonbaty et al., 2004; Khashaba, 2004; Tsao and Hocheng, 2004; Langella et al., 2005; Mohan et al., 2005; Singh and Bhatnagar, 2005a, 2005b; Tsao and Hocheng, 2005c], tendo como base a escolha adequada dos parâmetros processuais e da ferramenta de corte (*geometria e material*). De acordo com estes autores, a selecção da ferramenta de corte (*material e geometria*) a utilizar na execução de furos bem como a selecção adequada dos parâmetros processuais são os principais factores a levar em consideração de forma a evitar ou minimizar a ocorrência de defeito de delaminação. Desta forma, é efectuada uma descrição da influência dos parâmetros processuais bem como das ferramentas de corte na furação de materiais compósitos de matriz polimérica.

4.1 Parâmetros Processuais

Os parâmetros processuais, velocidade de corte (V_c) e avanço (a), apesar de serem dependentes do material a maquinar, apresentam influência directa na qualidade do furo obtida, de acordo com diversos autores [Koenig et al., 1985; Tagliaferri et al.,

1990;Komanduri et al., 1991;Hocheng et al., 1992;Hocheng and Puw, 1993;Jain and Yang, 1993, 1994;Caprino and Tagliaferri, 1995;Lin and Chen, 1996;Inoue et al., 1997;Enemuoh et al., 2001;Davim and Reis, 2003a, 2003b;Bhatnagar et al., 2004b;Davim et al., 2004b, 2004a;El-Sonbaty et al., 2004;Khashaba, 2004;Mohan et al., 2005;Tsao and Hocheng, 2005b, 2005c]. Uma escolha incorrecta destes parâmetros conduz a uma inesperada degradação do material, por intermédio do arrancamento de fibras, dano térmico e delaminagem. A qualidade superficial é o principal factor a ter em consideração na furação de materiais compósitos, contrariamente ao que sucede nos materiais convencionais [Caprino and Tagliaferri, 1995].

Koenig et al., 1985, Tagliaferri et al, 1990, e Di Ilio et al, 1991, avaliaram o efeito dos parâmetros processuais na furação de compósito reforçado a fibras de vidro e verificaram que a qualidade do furo é fortemente dependente do avanço. De acordo com estes autores, juntamente com Hocheng et al, 1993; Chambers and Bishop, 1995 e Piquet et al., 2000, baixos avanços (0.025-0.05 mm/rot) conduzem a boa qualidade. Verificaram também que a velocidade de corte apresenta menor influência na qualidade do furo, embora velocidades de corte moderadas permitam boa qualidade.

Lin and Chen, 1996, efectuaram ensaios de furação a alta velocidade, num compósito de matriz epóxida reforçado com 60% de fibras de carbono, utilizando velocidades de corte compreendidas entre 210 e 859m/min. Os resultados obtidos demonstraram que a utilização de velocidades de corte elevadas conduzem a uma qualidade do furo aceitável, praticamente isento de delaminagem, devendo-se a este facto o uso de baixos avanços (0.03 - 0.07 mm/rot). Contudo Hocheng et al, 1993, reporta que a utilização de velocidades de corte elevadas e baixos avanços conduzem a um aumento da temperatura gerada, originando a degradação da estabilidade da matriz produzindo fraca qualidade do furo.

Segundo Inoue et al. 1997, a utilização de elevadas velocidades de corte (188-753m/min) em compósitos reforçados com fibra de vidro e avanços de 0.05mm/rot permite obter furos com uma boa qualidade, enquanto baixos avanços (0.001mm/rot) permitem obter furos de elevada qualidade.

Enemuoh et al. (2001) utilizaram a metodologia de Taguchi para determinarem os parâmetros de corte adequados de forma a obter a melhor qualidade na furação de compósitos de matriz epóxida reforçada com carbono.

Por sua vez, *Davim and Reis, 2003a*, realizam ensaios em compósitos de matriz epóxida reforçada a fibras de carbono utilizando velocidades de corte e avanços compreendidos entre 16 e 32m/min e 0.04 e 0.15mm/rot, respectivamente. Verificaram que o aumento da velocidade de corte conjuntamente com o avanço conduzia a pior qualidade do furo.

Khashaba, 2004, realizou ensaios em diversos compósitos reforçados a vidro com velocidades de corte e avanços compreendidas entre 11 e 46m/min e 0.03 e 0.3mm/rot, respectivamente. Os resultados obtidos demonstraram, mais uma vez, que o avanço é mais preponderante na qualidade do furo do que a velocidade de corte. Por sua vez, *El-Sonbaty et al., 2004* efectuaram ensaios num compósito reforçado a vidro com diferentes percentagens volúmicas, no qual verificaram que a pior qualidade do furo fora obtida para um avanço de 0.23mm/rot e uma velocidade de corte de 5m/min.

Recentemente, *Tsao and Hocheng, 2005a* avaliaram o efeito do avanço na qualidade do furo em compósitos reforçados a fibras de carbono obtidos por autoclave, mantendo uma velocidade de corte constante de 31m/min. Verificaram que a diminuição do avanço (0.018-0.008mm/rot) conduzia a melhorias significativas na qualidade do furo.

Após à análise dos diversos estudos apresentados sobre a influência dos parâmetros processuais na qualidade do furo, verifica-se que o *avanço* é preponderante na qualidade do furo a obter, independentemente da *velocidade de corte* empregue e do material a maquinar.

Na Tabela 4.1 podemos observar os parâmetros processuais, *velocidade de corte e avanço*, empregues na furação dos materiais compósitos de matriz polimérica.

Tabela 4.1 – Parâmetros processuais (V_c e a) empregues na furação de materiais compósitos

Material	Velocidade de corte [m/min]	Avanço [mm/rot]	Autor
GFRP	1 - 41	0.006 - 2.63	<i>Caprino and Tagliaferri, 1995</i>
CFRP	50	0.05	<i>Chambers and Bishop, 1995</i>
CFRP	210 - 859	0.03 - 0.07	<i>Lin and Chen, 1996</i>
GFRP	188 - 753	0.001 - 0.05	<i>Ionue, et al., 1997</i>
CFRP	16 - 32	0.04 - 0.15	<i>Davim and Reis, 2003</i>
GFRP	11 - 46	0.03 - 0.3	<i>Khashaba, 2004</i>
GFRP	5 - 46	0.05 - 0.23	<i>El-Sonbaty et al., 2004</i>
CFRP	31	0.008 - 0.018	<i>Tsao and Hocheng, 2005</i>
GFRP	7	0.1 - 0.7	<i>Mohan et al., 2005</i>

GFRP- Glass Fiber Reinforced Plastics; CFRP - Carbon Fiber Reinforced Plastics

4.2 Ferramentas de Corte

4.2.1 Material

A furação de materiais compósitos requer a utilização de ferramentas de corte com elevada resistência ao desgaste e, em particular, à abrasão face à natureza abrasiva dos reforços e da sua baixa condutividade térmica, causando um aumento de temperatura na ferramenta. A primeira escolha recai sobre as ferramentas de diamante policristalino (PCD), sendo recomendadas para a maquinagem de grandes séries de peças em materiais extremamente abrasivos, como os materiais compósitos reforçados a fibras, devido à sua elevada dureza [Hocheng and Puw, 1992; Edwards, 1993; Jahanmir et al., 1999; Velayudham et al., 2005]. No entanto apresentam como principal desvantagem o seu elevado custo, comprometendo deste modo a sua vasta utilização e a sua aplicação em produção unitária ou pequenas séries de peças. Deste modo, o carboneto sinterizado (WC-Co) com 6% de cobalto (ISO 513), face as excelentes propriedades que possui, é a classe de material mais utilizada na furação dos materiais compósitos, embora os carbonetos apresentem uma vida útil bastante inferior ao diamante policristalino [Chambers and Bishop, 1995; Jahanmir et al., 1999; Piquet et al., 2000].

De acordo com *Mehta et al., 1992 e Hocheng and Puw, 1992*, a utilização de ferramentas de aço rápido (HSS) na furação dos materiais compósitos é inadequada face ao rápido desgaste sofrido pela broca. *Sakuma et al., 1984 e Malhotra, 1990* corroboram a opinião afirmando que o desgaste nas ferramentas de corte de aço rápido (HSS) é bastante superior ao obtido nas ferramentas de corte de carbonetos sinterizados na furação de materiais compósitos.

Chambers and Bishop 1995 utilizaram brocas de carbonetos de tungstênio e diamante policristalino (PCD) para realizar furos em compósitos reforçados a fibras de carbono. Verificaram que a broca de carboneto de tungstênio ao fim de 5 minutos de corte apresentou um desgaste na aresta de corte de 0.25mm, enquanto a broca de diamante policristalino ao fim de 10 minutos de corte apresentou um desgaste na aresta de corte de 0.1mm. A broca de diamante policristalino apresentou melhor desempenho ao nível do desgaste que a broca de carboneto de tungstênio.

Lin and Chen, 1996, verificaram que a utilização de velocidades de corte elevadas (210-859m/min) na furação de compósitos reforçados a fibras de carbono, conduzem a um desgaste (gume transversal, guias e quina) acelerado nas brocas de carboneto sinterizado (K10), causando uma alteração da geometria de corte. O desgaste da ferramenta é o principal entrave na furação de materiais compósitos reforçados a fibras de carbono a alta velocidade, sendo necessário a introdução de novos materiais, nomeadamente o PCD, para ultrapassar o rápido desgaste na ferramenta.

Chen, 1997, verificou que a utilização de velocidades de corte na ordem dos 100m/min, em compósitos laminados de carbono unidireccionais e multidireccionais, conduz a um desgaste significativo na aresta de corte (0.8mm) na broca de aço rápido ao fim de 26 furos.

Piquet et al, 2000, recomendam a utilização de brocas de carboneto de tungstênio com microgrão (K20), para a furação de compósitos reforçados a fibras de carbono em detrimento das brocas de diamante policristalino face ao seu custo.

Ramulu et al., 2001, observaram que as brocas de aço rápido (HSS), aço rápido com cobalto (HSS-Co) apresentaram um enorme desgaste na aresta de corte e na cratera, enquanto a broca de carbonetos sinterizados apresentou um desgaste mínimo (0.1mm) na aresta de corte para um compósito reforçado a fibras de carbono.

Davim e Reis 2003a, verificaram que a broca de carboneto sinterizado (K10) não apresentou qualquer desgaste, enquanto a broca de aço rápido apresentou um desgaste na aresta de corte de 0.012mm, ao fim de 18 furos, num compósito laminado reforçado com 55% de fibras de carbono para diversas condições de corte.

4.2.2 Geometria de Corte

Numa primeira abordagem, a operação de furação dos materiais compósitos realizou-se com recurso a geometrias de corte convencionais para os materiais metálicos, face à ausência de outro tipo de geometrias de corte [*Koenig et al., 1985; Park et al., 1995*]. No entanto, após alguns estudos efectuados, verificou-se que as geometrias convencionais não eram aconselhadas para a abertura de furos em materiais compósitos, dado que causam diversos defeitos (danos) tais como, a delaminação à entrada e saída do furo, o defeito de circularidade e o dano térmico causado na parede do material compósito [*Konig e Grass, 1989; Ho-Cheng and Dharan, 1990; Jain and Yang, 1993; Adams, 1996*]. Com o intuito de proporcionar um corte eficiente nos materiais compósitos de forma a reduzir os defeitos mencionados, foram desenvolvidas, por parte de diversos fabricantes, geometrias de corte especiais.

Na Figura 4.1 podemos observar algumas das geometrias de corte especiais empregues por diversos autores [*Mehta et al., 1992; Enemuoh et al., 2001; Davim and Reis, 2003a; Enemuoh and El-Gizawy, 2003; Tsao and Hocheng, 2003; Davim et al., 2004b, 2004a; El-Sonbaty et al., 2004; Tsao and Hocheng, 2004; Singh and Bhatnagar, 2005a, 2005b*] na furação de materiais compósitos de matriz polimérica. A geometria de corte da broca desempenha um papel fundamental na minimização dos defeitos causados no material compósito.

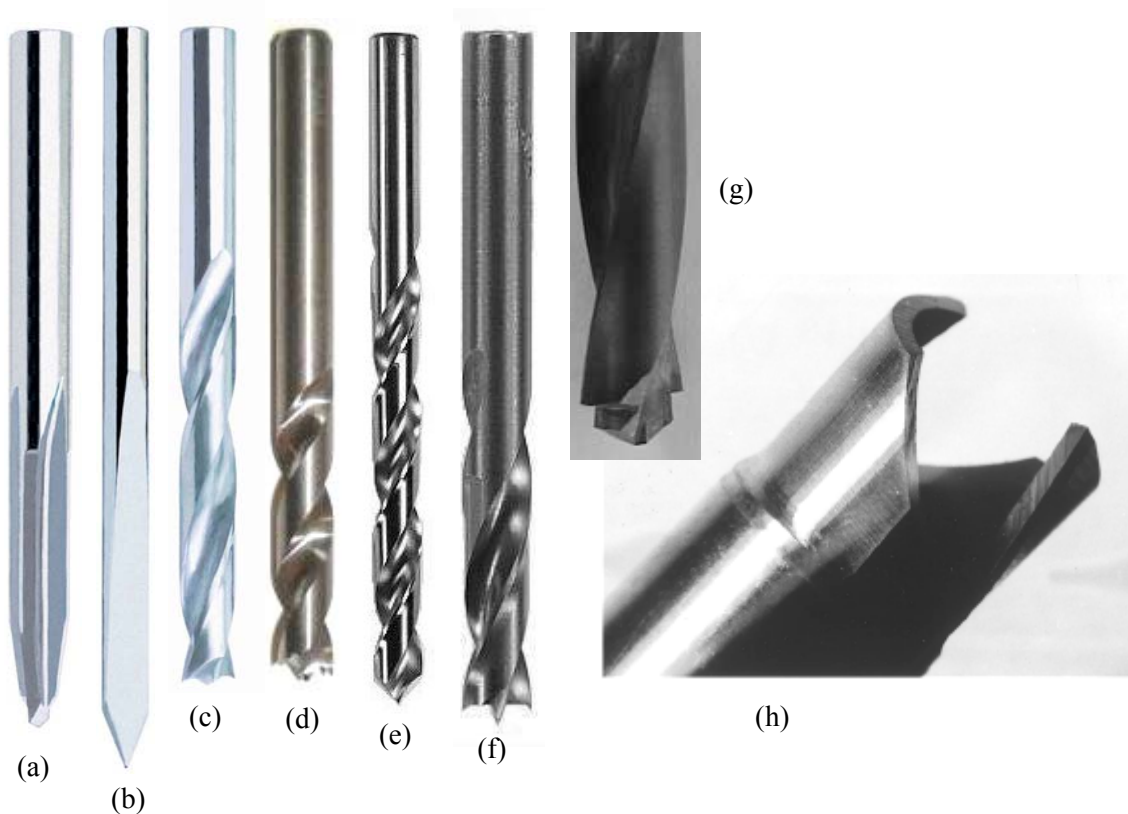


Figura 4.1 – Geometrias de corte especiais empregues na furação de materiais compósitos (a) Taper (b) Dagger (c) Candle stick (d) Brad & Spur (e) Parabolic point (f) Brad (g) Jodrill e (h) Trepanação ²³

Mehta et al., 1992, compararam diversas geometrias de corte na furação de compósitos reforçados com fibras de carbono, e recomendam a utilização de brocas “Dagger” e brocas com oito arestas de corte para a abertura de furos neste material. No entanto, *Persson et al., 1997*, concluíram que a broca “Dagger” apresentava melhor desempenho que a broca de oito arestas de corte.

Chambers and Bishop 1995 avaliaram o efeito da geometria de corte na furação de um material compósito de matriz epóxida reforçado com 60% de fibras com 5mm de espessura. Realizaram ensaios com três brocas de carbonetos sinterizados (K10) de diferente geometria, helicoidal ($\sigma=118^\circ$), “Dagger” ($\sigma=30^\circ$) e “multifacetada” (SAAB), com diâmetro de 6mm, utilizando velocidades de corte de 50m/min e avanços de 0.05mm/rot. Os resultados obtidos demonstraram que a broca “Dagger” apresenta melhor desempenho ao nível do processo de corte e desgaste da ferramenta, comparativamente com as restantes brocas, helicoidal e multifacetada.

²³ <http://www.sterlingcarbide.com>

Lin and Chen, 1996, utilizaram brocas helicoidais e multifacetadas (*CUMET*) de carbonetos sinterizados (K10) num compósito de matriz epóxida reforçado com 60% de fibras de carbono. Os autores verificaram que, face ao rápido desgaste na geometria de corte derivado das elevadas velocidades de corte (210-859m/min) utilizadas, a broca multifacetada não apresentou melhor desempenho que broca helicoidal, como esperado.

Mathew et al, 1999a, efectuaram um estudo comparativo entre brocas helicoidais e brocas de trepanação, no qual verificaram que a broca de trepanação apresentou desempenho superior.

Piquet et al, 2000 investigaram o efeito da geometria de corte na qualidade obtida num compósito de matriz epóxida reforçada a fibras de carbono, comparando uma broca helicoidal com uma broca especial de 3 arestas de corte. Verificaram que a broca especial apresentou qualidade superior, e demonstraram que a broca helicoidal apenas apresenta bons resultados caso se execute previamente um furo de menor diâmetro.

Davim and Reis 2003a e Davim et al., 2004a utilizaram brocas helicoidais, brocas de quatro arestas de corte e brocas especiais (“*Brad & Spur*”) para avaliar a influência da geometria de corte na furação de diferentes compósitos (CFRP e GFRP). Os autores verificaram que, independentemente do material compósito, a broca especial “*Brad & Spur*” apresenta o melhor desempenho entre as diversas geometrias sendo recomendada a sua utilização para a execução de furos em materiais compósitos.

Hocheng and Tsao 2003, Tsao and Hocheng 2004/2005, avaliaram o efeito da geometria de corte utilizando cinco brocas, nomeadamente, a broca helicoidal, a broca “*Candle Stick*”, a broca “*Core*”, a broca de 6 arestas de corte “*Saw drill*” e a broca escalonada “*step drill*” em compósitos reforçados com fibra de carbono com espessura de 5mm. Os autores verificaram que as brocas “*Candle Stick*” e de 6 arestas de corte “*Saw drill*” apresentaram melhor qualidade no furo comparativamente com as restantes brocas.

Singh and Bhatnagar, 2005 efectuaram um estudo comparativo entre diversas geometrias de corte de forma a avaliar a sua influência na furação de compósitos unidireccionais reforçados a fibras de vidro. Os autores utilizaram brocas de 4 facetas, 8 facetas, brocas “*Jodrill*” e brocas de ponta parabólica “*Parabolic point*” e verificaram que a broca “*Jodrill*” apresentou a melhor qualidade no furo.

4.3 Avaliação da Operação de Furação nos Materiais Compósitos

Após a descrição dos parâmetros de entrada, *parâmetros processuais*, *ferramenta de corte* (*material e geometria*) e *material a maquinar*, que afectam a operação de furação dos materiais compósitos, efectua-se de seguida a avaliação do processo, passando pela análise das forças de corte, delaminação, acabamento de superfície, conforme se ilustra na Figura 4.2.

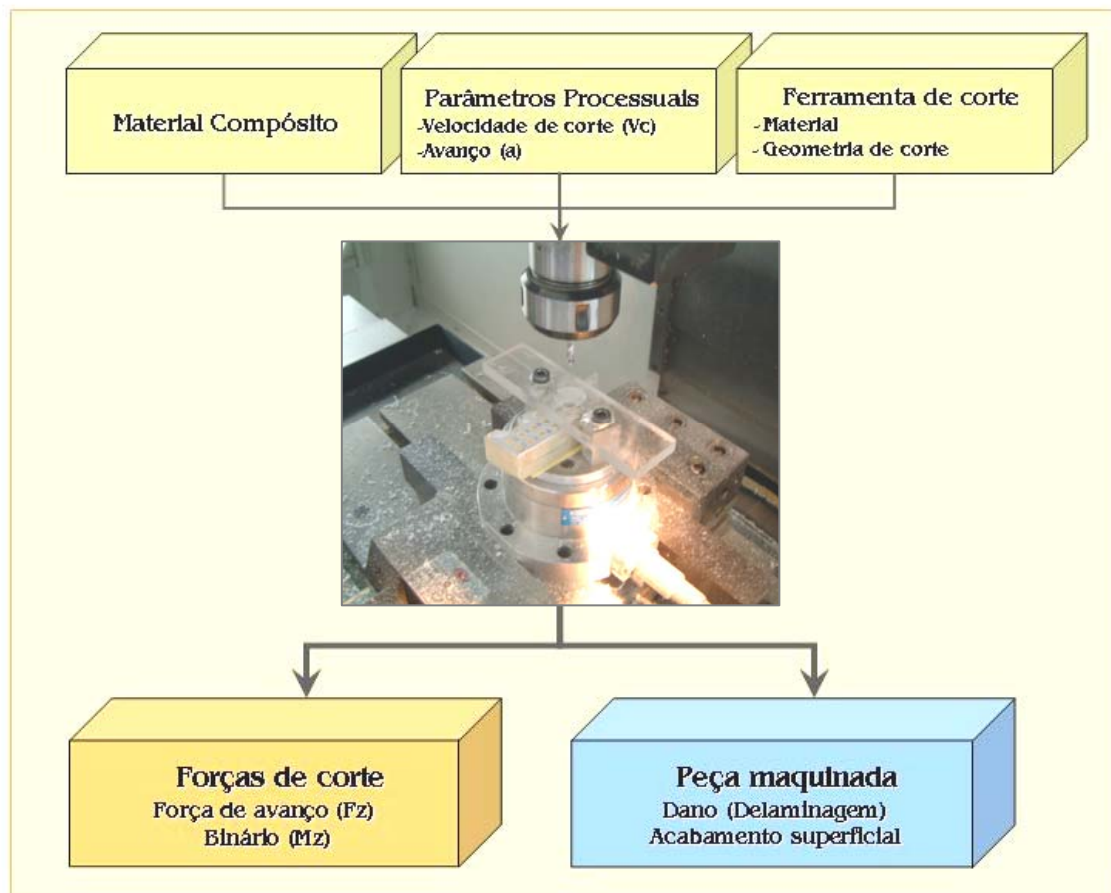


Figura 4.2 – Avaliação da furação de materiais compósitos

4.3.1 Forças de Corte

De acordo com diversos autores, [Koenig *et al.*, 1985; Tagliaferri *et al.*, 1990; Komanduri, 1993; Mathew *et al.*, 1999a, 1999b] a furação de materiais compósitos requer forças de corte baixas sendo um requisito fundamentalmente para a obtenção de boa qualidade no furo. As forças de corte associadas ao processo podem ser reduzidas recorrendo à alteração

da geometria de corte (*geometrias especiais*) ou pela redução do avanço, visto que a força de avanço é directamente proporcional ao avanço. Por sua vez as forças de corte, *força de avanço* (F_z) e o binário (M_z), são fortemente dependentes dos parâmetros processuais, geometria de corte da broca, material a maquinar [Chambers and Bishop, 1995; Lin and Chen, 1996; Mathew et al., 1999a; Lachaud et al., 2001; Khashaba, 2004; Tsao and Hocheng, 2004].

A força de avanço tem sido vastamente citada como sendo a principal causa pela ocorrência do defeito de delaminação [Hocheng and Dharan, 1990; Jain and Yang, 1993, 1994; Park et al., 1995; Lin and Chen, 1996; Stone and Krishnamurthy, 1996; Chen, 1997; Nobe et al., 1998; Piquet et al., 2000; Capello and Tagliaferri, 2001; Zhang et al., 2001a]. A minimização desta força conduz a uma redução significativa no defeito de delaminação após furação. Diversas técnicas de furação têm vindo a ser desenvolvidas com o objectivo de minimizar a força de avanço, tendo como base a escolha adequada dos parâmetros processuais e da geometria de corte. Outros factores, como a colocação de uma placa de suporte e a realização de um pré-furo de diâmetro adequado, têm igualmente merecido a devida atenção segundo [Komanduri, 1993; Ogawa et al., 1997; Piquet et al., 2000; Won and Dharan, 2002b; Davim and Reis, 2003b; Tsao and Hocheng, 2003; Capello, 2004; Tsao and Hocheng, 2005c]. O principal objectivo das diferentes técnicas é sempre a minimização da força de avanço exercida sobre o material compósito. O avanço deve ser baixo dada a natureza frágil das fibras de carbono, sem no entanto causar aquecimento exagerado da matriz. A velocidade de corte deve ser elevada de acordo com as possibilidades do material da ferramenta.

De acordo com a literatura, [Hocheng and Puw, 1992; Hocheng et al., 1992; Hocheng and Puw, 1993; Jain and Yang, 1994; Ramulu, 1997; Lin and Shen, 1999; Capello and Tagliaferri, 2001; Davim and Reis, 2003a; Davim et al., 2004b, 2004a; El-Sonbaty et al., 2004] o parâmetro processual, avanço (a), apresenta influência directa na força de avanço (F_z), ou seja, o aumento do avanço conduz ao aumento da força de avanço. É de referir que a influência do avanço é bastante superior à da velocidade de corte. A título de exemplo é ilustrada na Figura 4.3 a influência do avanço sobre a força de avanço.

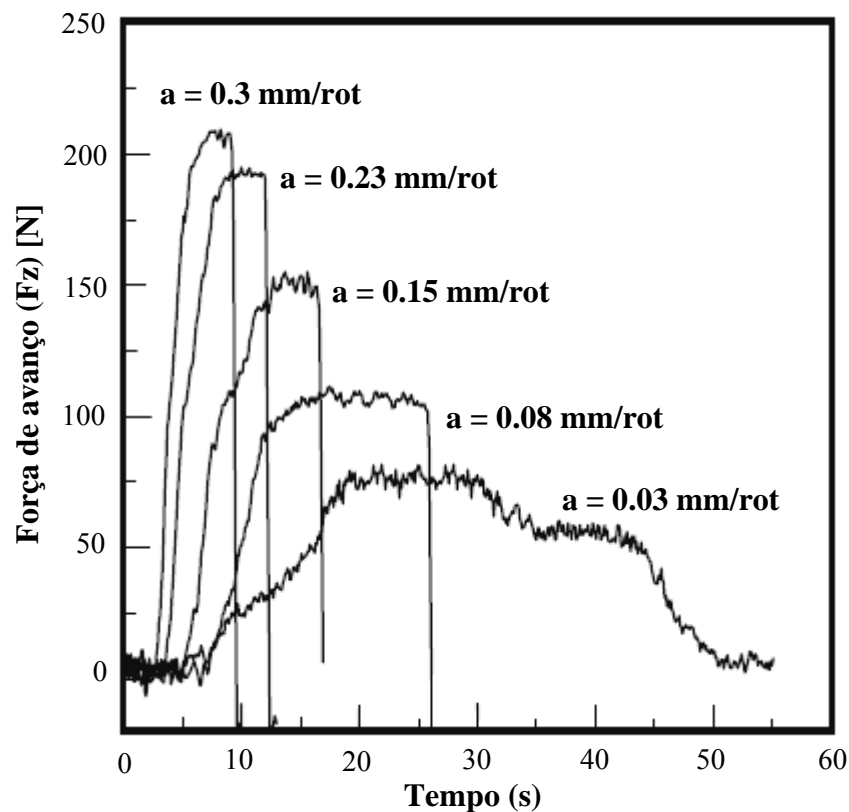


Figura 4.3 – Influência do parâmetro processual avanço na força de avanço (F_z) de um compósito obtido por moldação manual [Khashaba, 2004]

Da mesma forma que os parâmetros processuais, a geometria de corte também apresenta influência nas forças de corte. A Figura 4.4 ilustra o comportamento das forças de corte, *força de avanço e binário*, ao longo da execução de um furo passante num material compósito laminado, utilizando uma broca helicoidal. O ponto A, representa o contacto entre a ferramenta e o material a maquinar. A rápida subida da força de avanço do ponto A para o ponto B representa a resposta elástica do material. No ponto B inicia-se o corte do material em que o segmento B-C representa a força exercida pela ponta da ferramenta no material. A força de avanço máxima é alcançada no ponto C, seguida de uma diminuição ao longo da profundidade do furo. Este decréscimo deve-se à diminuição da rigidez do material durante a realização do furo. Por vezes a força de avanço é atingida durante o segmento C-D, contrariamente ao que é ilustrado, devendo-se a este facto o alojamento da apara no furo durante o corte, provocando um aumento na força. A diminuição acentuada da força do ponto D para o ponto E é atribuída à delaminação nas últimas camadas do

material por parte da ponta da broca. O ponto E representa o emergir da ponta da ferramenta no material. O segmento E-F corresponde à conclusão da operação de furação.

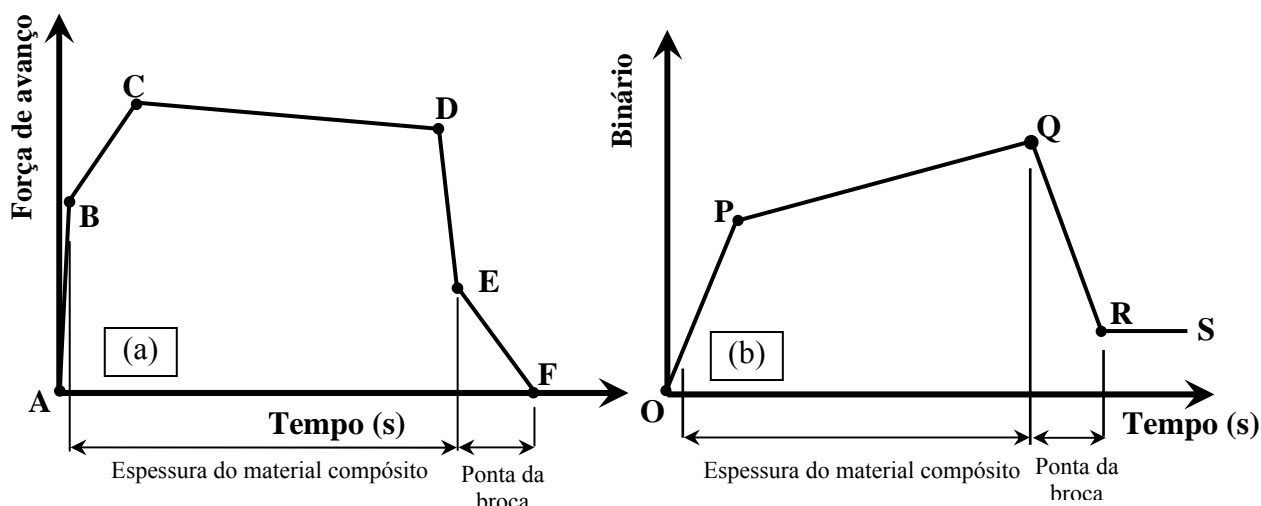


Figura 4.4 – Comportamento da força de avanço (a) e binário (b) ao longo da execução de um furo utilizando uma broca helicoidal [Dharan and Won, 2000]

Relativamente ao binário, Figura 4.4 (b), verifica-se um aumento do ponto O para o ponto P, associado ao contacto entre a aresta de gume transversal e o material compósito. De seguida verifica-se uma ascensão gradual no segmento P-Q em função do raio da broca em que totaliza o comprimento máximo das arestas de cortes. Este aumento deve-se ao contacto entre as arestas de corte e a parede do furo, conduzindo a um aumento linear do binário ao longo do furo. A diminuição do binário representado no segmento Q-R deve-se à saída da ponta da broca na superfície oposta do material, deixando de existir contacto entre as arestas de corte e o material. Finalmente, o segmento R-S representa o contacto entre as guias da broca e a parede do furo quando a broca acaba de executar o furo passante.

Davim et al., 2004a, 2004b e Fernandes and Cook, 2005, avaliaram as forças de corte utilizando brocas especiais, nomeadamente broca “Brad & Spur” e broca “Tapper” e verificaram que o comportamento das forças de corte ao longo do furo para as brocas especiais é diferente quando comparado com o ilustrado, conforme se observa pela Figura 4.5.

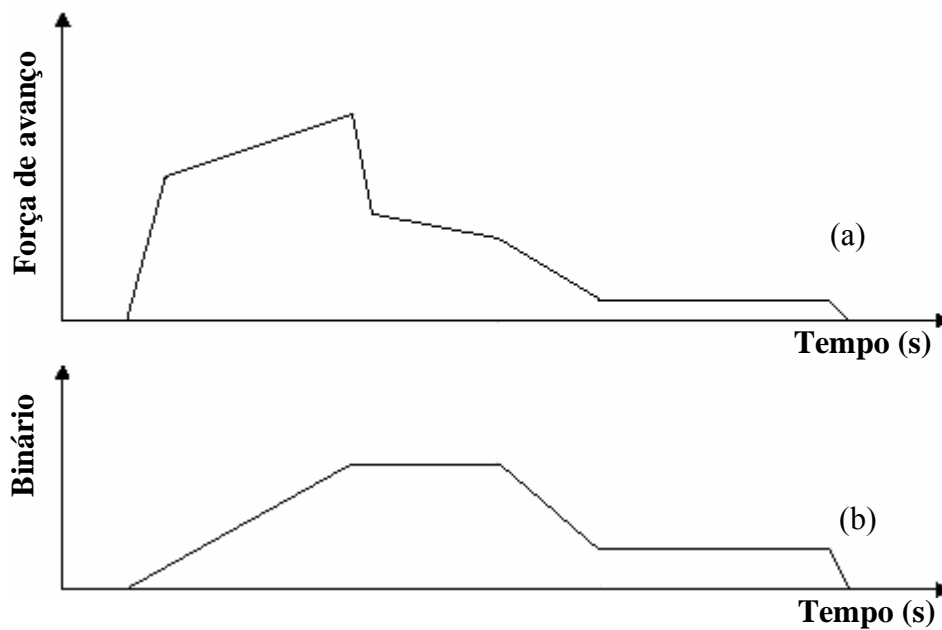


Figura 4.5 – Comportamento da força de avanço (a) e binário (b) ao longo da execução de um furo utilizando a broca especial “Tapper” [Fernandes and Cook, 2005]

Chambers and Bishop 1995 indicam que o aumento do avanço conduz ao aumento das forças de corte (avanço e binário), independentemente da geometria de corte. No entanto, verificaram que para as mesmas condições de corte ($V_c = 50\text{m/min}$ e $a = 0.05\text{mm/rot}$), a broca “Dagger” apresentou forças de avanço cerca de 30% inferiores às obtidas pelas brocas helicoidal e multifacetada, estando este facto relacionado com o ângulo de ponta da broca ($\sigma = 30^\circ$). Finalmente, os autores argumentam que apesar das forças de avanços elevadas conduzirem ao aparecimento do defeito de delaminagem, à entrada e saída do furo, esta por sua vez reduz o dano térmico na parede do furo.

Lin and Chen, 1996 indicam que a força de avanço, para velocidade de corte elevadas ($210\text{-}850\text{ m/min}$), aumenta drasticamente em função desta e que as brocas multifacetadas apresentam forças de avanço (F_z) superiores às obtidas pelas brocas helicoidais, sendo a diferença mais significativa com o aumento da velocidade de corte. O desgaste rápido da ferramenta de corte é a principal razão pelo aumento da força de avanço, conduzindo a uma alteração significativa da geometria, levando a que broca multifacetada apresente forças de avanço superiores relativamente à broca helicoidal. No entanto, *Sakuma and Seto, 1983* reportam que a utilização de velocidades de corte baixas conduzem a forças de avanço inferiores por parte da broca multifacetada comparativamente à broca helicoidal e

que esta reduz o aparecimento da delaminação. No que diz respeito ao binário, *Lin and Chen 1996*, indicam que a velocidade de corte conduz a um aumento pouco significativo no binário e que a broca multifacetada apresenta valores de binários inferiores aos obtidos pela broca helicoidal para velocidade de corte elevadas (850m/min).

Chen, 1997, avaliou a influência da geometria de corte, nomeadamente o *ângulo de ponta* e o *ângulo de hélice* e dos parâmetros processuais nas forças de corte (força de avanço e binário) em compósitos laminados de carbono unidireccionais. Os resultados obtidos demonstraram que a força de avanço (F_z) aumenta com o ângulo de ponta e diminui com o ângulo de hélice, enquanto o binário (M_z) diminui com o ângulo de ponta e hélice, conforme se observa nas Figuras 4.6 e 4.7. O autor verificou também que as forças de corte (força de avanço e binário) aumentam em função do avanço (0.09 – 0.27mm/rot), contrariamente ao que acontece com velocidade de corte.

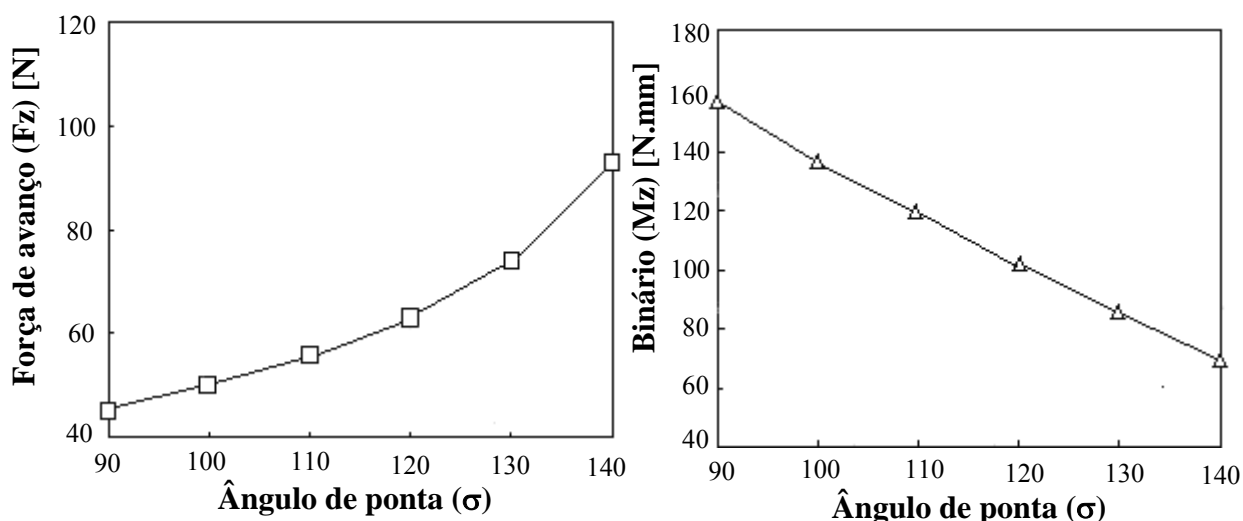


Figura 4.6 – Influência do ângulo de ponta (σ) na (a) força de avanço e no (b) binário [*Chen, 1997*]

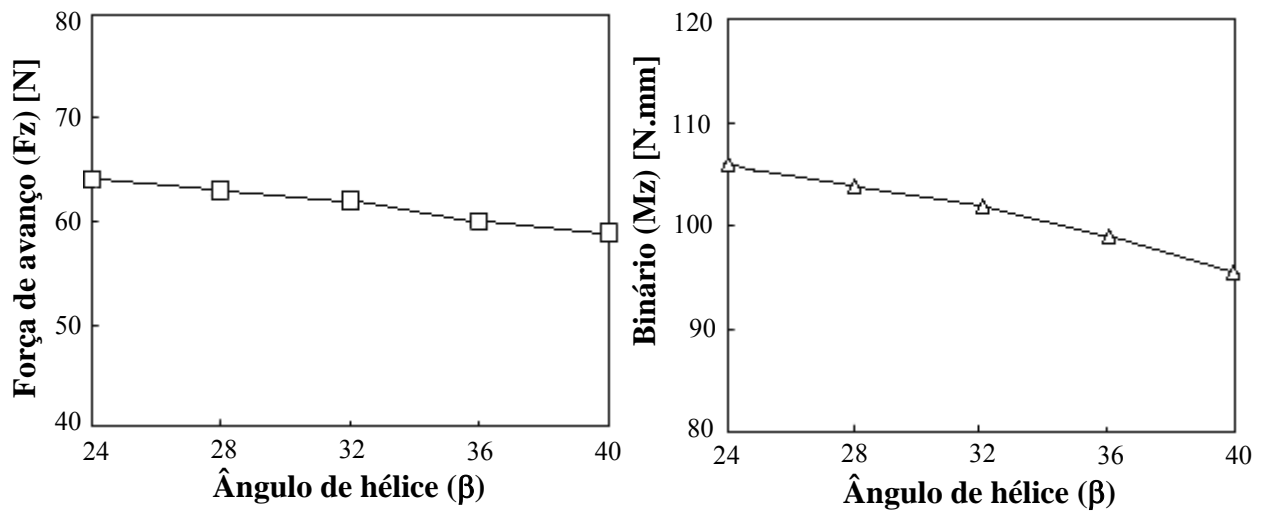


Figura 4.7 – Influência do ângulo de hélice (β) na (a) força de avanço e no (b) binário [Chen, 1997]

Mathew et al, 1999a indicam que a utilização de brocas de trepanação permite obter uma redução de 50% na força de avanço e 10 % no binário, quando comparadas com as brocas helicoidais. Por sua vez, indicam que a força de avanço e o binário aumentam em função do avanço, conforme se observa pela Figura 4.8. No entanto, diversos autores [*Komanduri, 1993; Ogawa et al., 1997; Piquet et al., 2000; Won and Dharan, 2002a*], argumentam que efectuando uma pré-furação é possível atingir uma redução de 60% na força de avanço.

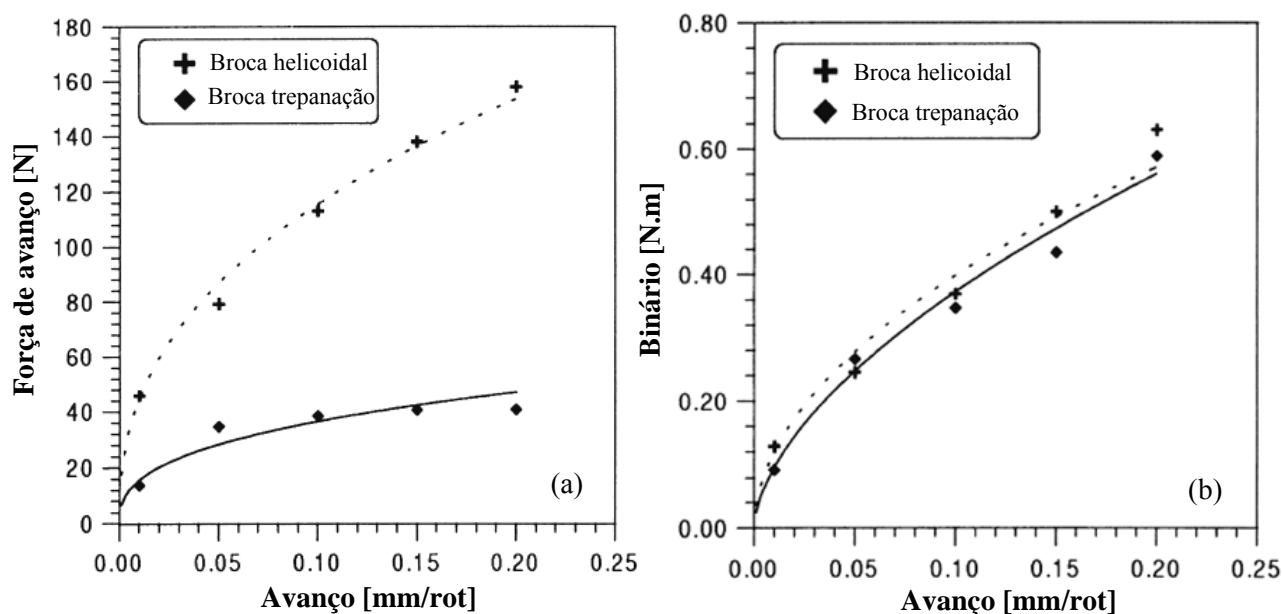


Figura 4.8 – Influência do avanço na (a) força de avanço e (b) binário para brocas com diferente geometria de corte num compósito reforçado a fibras de vidro [Mathew *et al.*, 1999a]

El-Sonbaty *et al.*, 2004, avaliaram a influência dos parâmetros processuais e do diâmetro da broca nas forças de corte, *força de avanço* (F_z) e *binário* (M_z), utilizando valores de velocidades de corte e avanços compreendidos entre 5,5 e 46,5m/min e 0,05 e 0,23mm/rot, respectivamente. Os resultados obtidos demonstraram que o aumento do avanço (0.05-0.23mm/rot) conduz a um aumento significativo da força de avanço (48-120N), enquanto que a velocidade de corte não apresenta influência significativa na força de avanço. No caso do binário, este diminui com o aumento da velocidade de corte e diminuição do avanço. Relativamente ao diâmetro da broca, verificaram que o aumento deste conduzia ao aumento da força de avanço e do binário, conforme se observa na Figura 4.9.

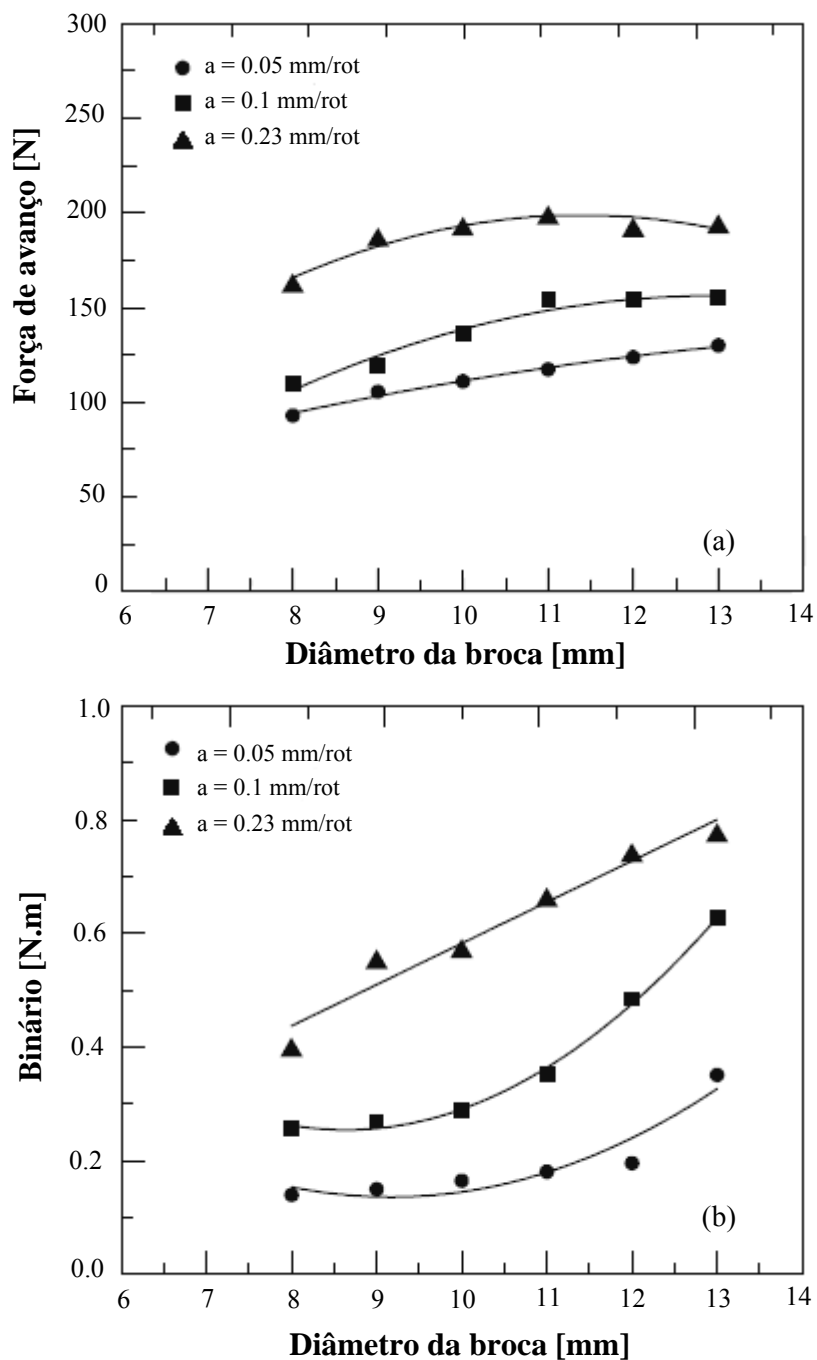


Figura 4.9 – Influência do diâmetro da broca na (a) força de avanço e (b) binário [El-Sonbaty et al., 2004]

Por sua vez, *Khashaba, 2004* avaliou a influência dos parâmetros processuais (V_c e a) e o tipo de material compósito (matriz/reforço) nas forças de corte. Contrariamente ao obtido por *El-Sonbaty et al., 2004*, verificou que a velocidade de corte apresenta influência na

força de avanço, ou seja a força de avanço aumenta em função da velocidade de corte, Figura 4.10.

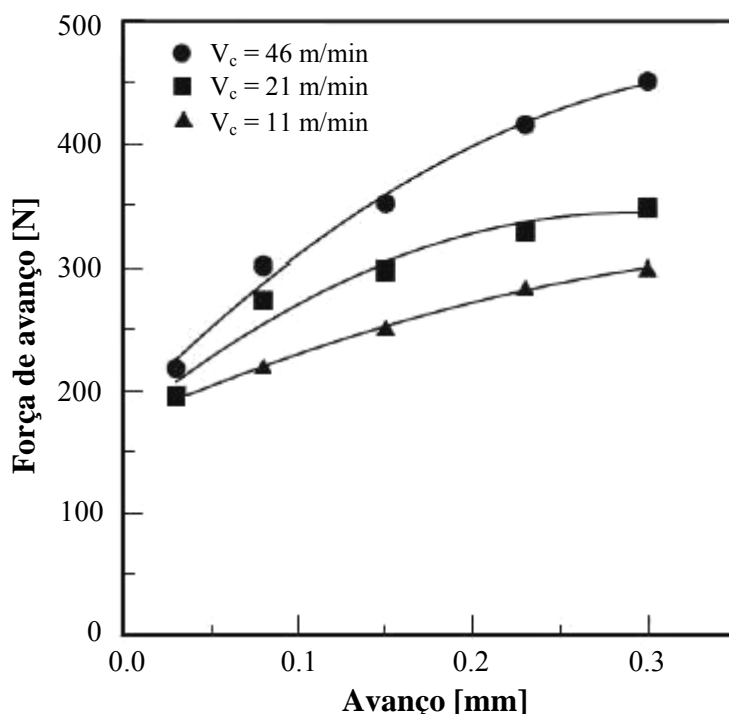


Figura 4.10 – Influência da velocidade de corte na força de avanço [Khashaba, 2004]

Singh e Bhatnagar, 2005 avaliaram a influência dos parâmetros processuais e da geometria de corte na força de avanço e no binário. Estes autores verificaram que a força de avanço diminui com o aumento da velocidade de corte e aumenta com o avanço, enquanto o binário aumenta ligeiramente com o avanço e permanece constante com a velocidade de corte. Verificaram também que a geometria de corte apresenta influência nas forças de corte, ou seja, a broca de 8 facetas apresentou o valor mais baixo para a força de avanço enquanto a broca “Jodrill” apresentou o valor mais baixo para o binário.

Tendo em consideração que a força de avanço é a principal responsável pela ocorrência do defeito de delaminação, diversos autores têm vindo a desenvolver modelos com vista a avaliar a força de avanço crítica que conduz ao início do defeito de delaminação [Hocheng and Dharan, 1990; Jain et al., 1991; Jain and Yang, 1994; Chandrasekharan et al., 1995; Stone and Krishnamurthy, 1996; Tsao and Chen, 1997; Lachaud et al., 2001; Zhang et al., 2001a; Won and Dharan, 2002a; Fernandes and Cook, 2005; Jung et al., 2005; Langella

et al., 2005]. Os modelos propostos pelos diversos autores são baseados no conceito clássico do mecanismo da fractura linear, em que relacionam a força de avanço com as propriedades e espessura do material compósito.

HoCheng and Dharan, 1990 propuseram um modelo que permite avaliar as condições críticas para o aparecimento da delaminação em materiais compósitos quasi-isotrópicos, no qual indicam que a força exercida pela ponta da broca é a principal razão para o aparecimento do defeito de delaminação. Posteriormente, *Jain and Yang*, 1991 propuseram uma extensão ao modelo de *Hocheng and Dharan*, 1990 de forma a contemplar materiais compósitos unidimensionais, no qual verificaram que a força de avanço exercida na ponta da broca deriva da aresta do gume transversal, dado que as arestas de corte apresentam pequena contribuição na direcção axial. Posteriormente, os mesmos autores *Jain and Yang*, 1993,1994 desenvolveram um modelo que correlaciona o avanço com o início do defeito de delaminação. *Chandrasekharan et al.*, 1995 propuseram um modelo que avalia a força de avanço e o binário em diferentes regiões ao longo do furo, e verificaram que não existe uma relação directa entre a geometria de corte da broca e o material compósito a maquinar.

Lachaud et al, 2001 e *Zhang et al.*, 2001 desenvolveram modelos teóricos que determinam a força de avanço crítica que conduz ao defeito de delaminação na saída do furo.

Won and Dharan, 2002 avaliaram a influência da aresta de gume transversal na força de avanço e propuseram um modelo inovador com vista a avaliar a vantagem da pré-furação. Estes autores indicam que a pré furação reduz, significativamente, a força exercida pela aresta de gume transversal. Por sua vez, *Tsao and Hocheng*, 2003 confirmam que a força de avanço é significativamente reduzida com a realização de uma pré-furação, em que o diâmetro do pré furo deve ser igual ao comprimento da aresta de gume transversal, de forma a eliminar a força exercida por esta.

Langella et al., 2005, propuseram um modelo que correlaciona o avanço e o ângulo de ponta com as forças de corte (força de avanço e binário), no qual verificaram que a força de avanço aumenta em função do avanço e do ângulo de ponta. Verificaram também que a influência da aresta de gume transversal aumenta em função do avanço.

4.3.2 Qualidade do Furo

4.3.2.1. Defeitos no Material Compósito

De acordo com *Konig and Grass, 1989; HoCheng and Dharan, 1990; Jain and Yang, 1993; Chambers and Bishop 1995; Lin and Chen, 1996; Piquet et al., 2000; Lachaud et al., 2001; Davim and Reis, 2003a, Davim et al., 2004; Ramkumar et al., 2004; Velayudham et al., 2005* a furação de materiais compósitos apresenta diversos defeitos (danos), sendo eles, delaminação à entrada e saída do furo, defeito de geométrico (*circularidade*) e dano térmico causado na parede do material compósito. No entanto, estes danos agravam-se com a ausência de uma placa de suporte durante a operação de furação, situação frequente na reparação de componentes estruturais já assembled. De referir ainda, que o desgaste da ferramenta de corte e a presença de aparas em pó durante a operação constituem um problema para a furação dos materiais compósitos [*Malhotra, 1990; Hocheng and Puw, 1992; Komanduri, 1993; Lin and Chen, 1996*].

A *delaminação à entrada* encontra-se relacionada com a geometria da broca e com as características da fibra do material, conduzindo desta forma à fractura da primeira camada quando a broca entra em contacto com o material.

A *delaminação à saída* é provocada pelas condições de corte impostas, dado que a aresta de gume transversal não permite efectuar o corte do material e conduz deste modo a um esforço de tracção nas camadas do material compósito. A delaminação entre as diversas camadas do material compósito propaga-se ao longo do diâmetro de furo e pode ocorrer a diferentes profundidades.

O *defeito geométrico* (*circularidade*) está relacionado com o ângulo das arestas de corte (*ângulo de ponta*), visto que as fibras, antes do corte, encontram-se sujeitas a esforços de compressão, conduzindo a uma forma elíptica do furo.

O *dano térmico* é causado pelo atrito existente entre as fibras e as arestas de corte da broca, causando deste modo dano na matriz do compósito ao longo da parede do furo. A remoção das fibras conduz a um defeito na parede do furo ao nível da rugosidade [*Lachaud et al., 2001*]. No entanto, a delaminação, seja à entrada ou saída, Figura 4.11, é a principal preocupação, dado que este defeito conduz a uma diminuição da resistência do material à fadiga, colocando em causa a integridade do componente [*Koenig et al., 1985; Di Ilio et al.,*

1992;Hocheng and Puw, 1992;Komanduri, 1993;Mander and Bhattacharyya, 1993;Chen, 1997;Zhang et al., 2001a;Ramkumar et al., 2004].

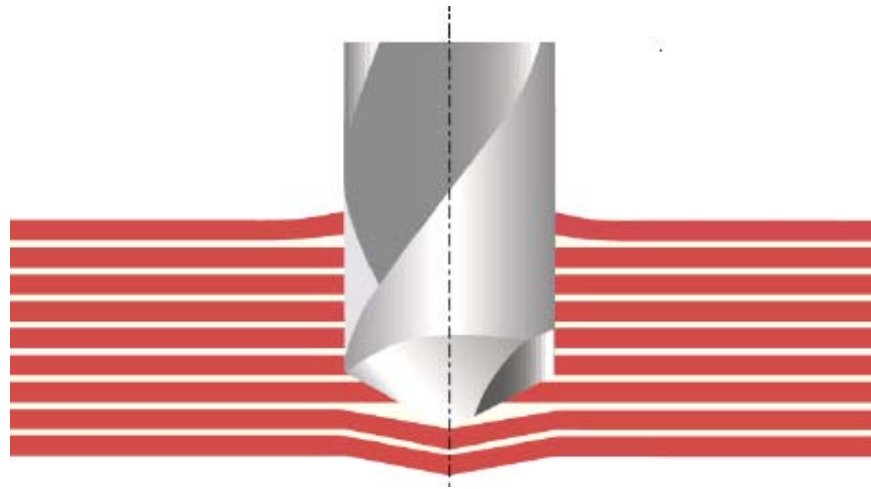


Figura 4.11 – Mecanismo de delaminação à entrada e saída do furo de um compósito laminado

Conforme mencionado anteriormente, o defeito de delaminação pode ser evitado ou minimizado caso seja efectuada uma escolha adequada da geometria de corte da ferramenta e dos parâmetros processuais a utilizar. Diversos autores [Koenig et al., 1985;Tagliaferri et al., 1990;Komanduri et al., 1991;Caprino and Tagliaferri, 1995;Enemuoh et al., 2001;Zhang et al., 2001a;Davim and Reis, 2003a, 2003b;El-Sonbaty et al., 2004;Khashaba, 2004;Mohan et al., 2005;Tsao and Hocheng, 2005b, 2005c] avaliaram a influência dos parâmetros processuais no defeito de delaminação, concluindo que o parâmetro avanço é determinante para a sua minimização, conforme se observa pela Figura 4.12.

Tsao and Chen 1997 e Khashaba, 2004 indicam que as condições de corte podem ser controladas de forma a obter furos sem que ocorra o defeito de delaminação. Para além dos parâmetros processuais e geometria de corte, a natureza das fibras e da matriz (tipo de resina) são factores a considerar, dado que também apresentam influência na ocorrência deste defeito.

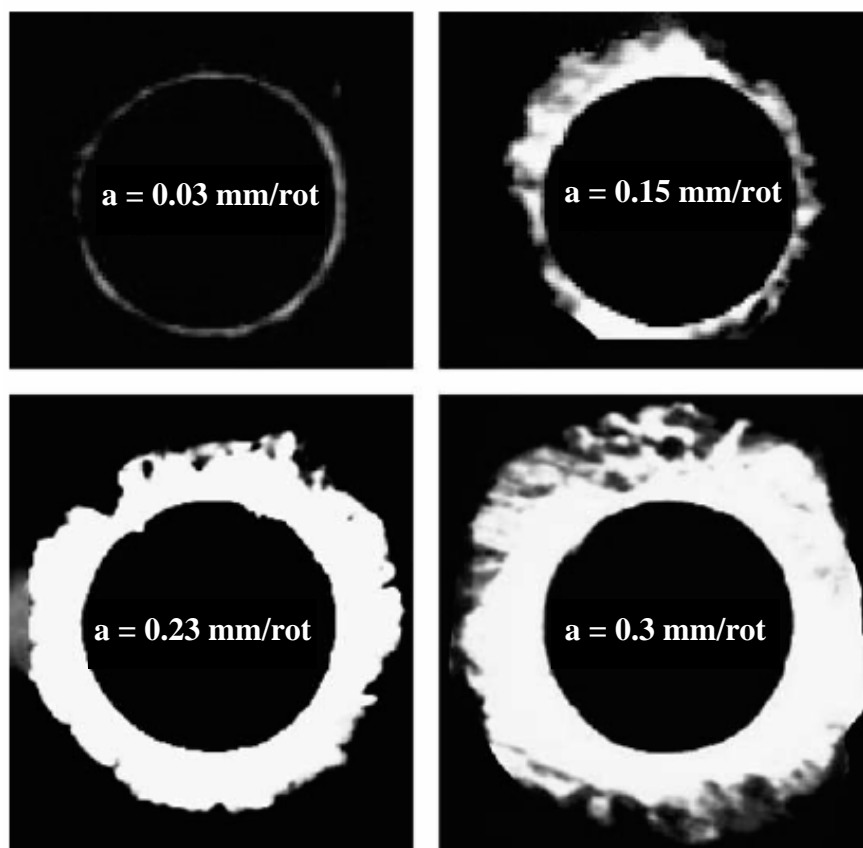


Figura 4.12 – Influência do avanço no defeito de delaminação à saída do furo[*Khashaba, 2004*]

Chambers and Bishop, 1995 avaliaram o efeito da geometria de corte na qualidade do furo utilizando brocas de diferente geometria, *helicoidal*, “*Dagger*” e “*multifacetada*”. Os autores verificaram que a broca “*Dagger*” apresentou fraca qualidade (*maior delaminação*) no furo comparativamente com as restantes brocas. A fraca qualidade obtida pela broca “*Dagger*” encontra-se relacionada com o ângulo de ponta da broca, visto que esta efectua uma fractura e separação das fibras em vez de um corte quando entra em contacto com o material, face às suas longas arestas de corte. Posteriormente, *Davim and Reis, 2003a* demonstraram que a broca helicoidal apresenta melhor qualidade no furo que a broca multifacetada. Por sua vez, *Mathew et al., 1999a* analisaram também o efeito da geometria de corte na qualidade do furo obtida, para uma velocidade de corte de 50m/min e um avanço de 0.2mm/rot, utilizando uma broca de trepanação e uma broca helicoidal. Estes autores verificaram que, para as mesmas condições de corte, a broca de trepanação conduz

a menor delaminação à entrada e saída do furo no material compósito comparativamente com a broca helicoidal, conforme se observa pela Figura 4.13.

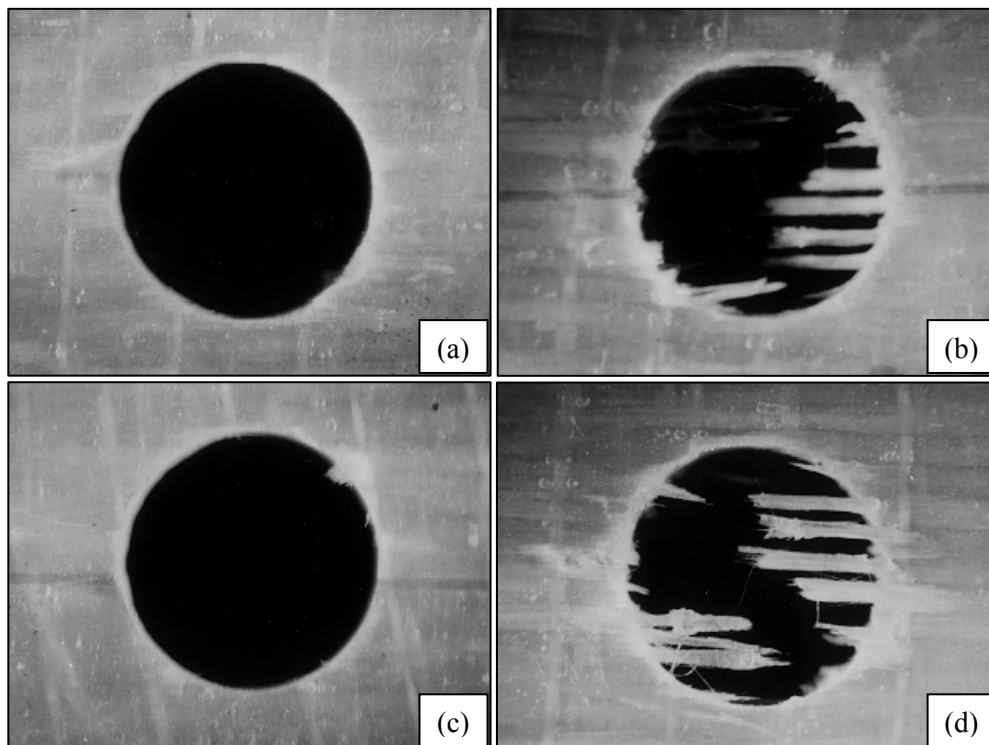


Figura 4.13 – Qualidade do furo à entrada (a e b) e saída (c e d) para a broca de trepanação e helicoidal respectivamente [Mathew *et al.*, 1999a]

Piquet *et al.*, 2000 demonstraram que a broca de geometria especial “OP”, (Figura 4.14) apresentou excelentes resultados ao nível do defeito de delaminação (*praticamente isento*) comparativamente com a broca helicoidal, concluindo que a aresta de corte principal de corte é determinante na qualidade do furo. Tsao and Hocheng, 2003 com o objectivo de analisar a influência da ponta da broca sobre o defeito de delaminação de compósito, elaboraram um modelo matemático demonstrando que o comprimento de contacto da aresta de corte apresenta grande influência sobre o defeito.

No entanto, a força de avanço exercida sobre o material tem sido citada por diversos investigadores como sendo a principal causa pela ocorrência do defeito de delaminação. Jain and Yang, 1994; Zhang *et al.*, 2001 e Khashaba, 2004 indicam que a forma de ultrapassar o defeito de delaminação à entrada e saída passa pela variação da força de avanço (*avanço*) durante a operação de furação.

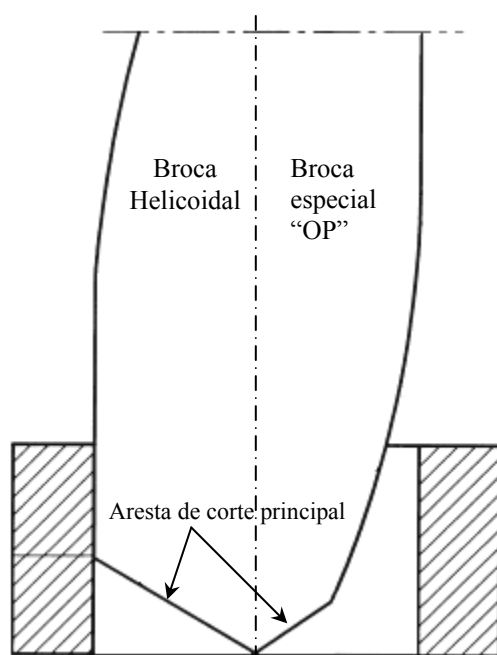


Figura 4.14 – Geometria de corte da broca helicoidal e especial “OP” [Piquet *et al.*, 2000]

Tagliaferri et al., 1990 indicam que existe uma correlação muito próxima entre a força de avanço e o defeito de delaminação nos materiais compósitos. Verificaram também que a zona delaminada é correlacionada com o rácio velocidade de corte e avanço.

Stone and Krishnamurthy, 1996 propõem um controlador da força de avanço para minimizar a delaminação durante a furação, em que a força seria continuamente monitorizada, e a cada três rotações da broca, seria possível alterar o avanço de acordo com os valores de força de avanço verificados.

Zhang et al., 2001(b); *Capello* 2004, *Tsao and Hocheng* 2005(a) demonstraram que a utilização de uma placa de suporte durante a operação de furação conduz a uma redução do defeito de delaminação, independentemente da geometria de corte utilizada, conforme se observa na Figura 4.15. *Tsao e Hocheng* 2005 (b), avaliou o efeito da excentricidade da ponta da broca sobre o defeito de delaminação, em que concluíram que a excentricidade da broca conduz ao aumento da força de avanço que por sua vez induz o defeito de delaminação no material compósito.

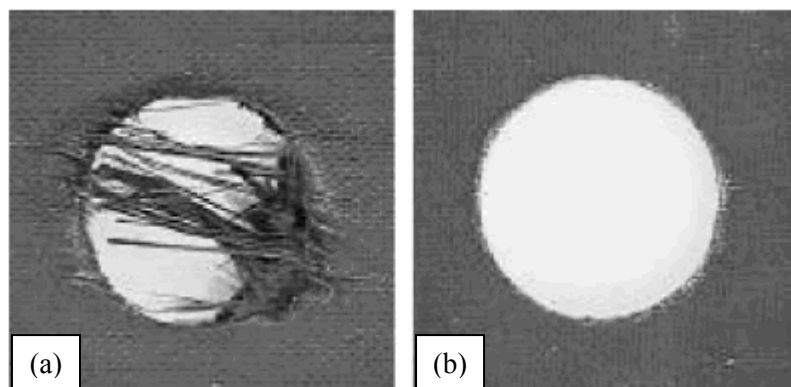


Figura 4.15 – Defeito de delaminação com (a) e sem (b) placa de suporte utilizando a broca “Saw” [Tsao and Hocheng, 2005c]

Caracterização do Defeito de Delaminação

A avaliação do defeito de delaminação no material compósito é efectuada com recurso a métodos não destrutivos, entre os quais, microscopia óptica, radiografia, “scanner”, inspecção ultra sónica com varrimento, geralmente conhecida por *C-Scan*, e tomografia axial computadorizada – *TAC*, de forma a avaliar a zona delaminada [Gao and Kim, 1999; Tsao and Hocheng, 2005a]. No entanto, foi necessário estabelecer critérios de avaliação da qualidade dos furos de forma a permitir a comparação do defeito de delaminação (extensão da zona delaminada).

Mehta et al., 1992 definiram um parâmetro designado por rácio de dano, (D_{RAT}), em que este é determinado pela razão entre o área delaminada e a área nominal do furo, sendo calculado pela seguinte expressão:

$$D_{RAT} = \frac{D_{MAR}}{D_{AVG}} \quad (4.1)$$

onde, D_{MAR} é a área delaminada e D_{AVG} é a área nominal do furo.

Por sua vez, Chen, 1997 definiu o factor de delaminação (F_d), sendo este factor determinado pela razão entre o diâmetro máximo delaminado, D_{max} , e o diâmetro nominal do furo, D_{furo} , sendo calculado pela seguinte expressão:

$$F_d = \frac{D_{\max}}{D_{\text{furo}}} \quad (4.2)$$

onde, D_{\max} é diâmetro máximo delaminado e D_{furo} é o diâmetro nominal do furo.

4.3.2.2. Acabamento de Superfície do Furo

A obtenção de bom acabamento de superfície na parede do furo é um objectivo a alcançar na furação de materiais compósitos, no entanto, verifica-se que não é fácil alcançá-lo face à natureza do material compósito. A heterogeneidade entre a matriz e o reforço conduz a uma superfície mais rugosa, que a superfície obtida em materiais metálicos, face à fragilidade do reforço [Arola and Ramula, 1994]. Hocheng e Puw, 1993 indicam que o acabamento de superfície nos materiais compósitos é função das suas características (*tipo de matriz e reforço*) e dos parâmetros processuais. Por sua vez, Ramulu et al., 1993 indicam que a rugosidade é fortemente dependente da orientação das fibras relativamente à direcção do corte. Hocheng e Puw, 1993 reportam que a utilização de velocidades de corte elevadas (>100m/min) e baixos avanços conduzem a um aumento da temperatura gerada, originando a degradação da estabilidade da matriz, produzindo mau acabamento de superfície na parede do furo.

Ogawa et al., 1997 argumenta que ambos os parâmetros processuais apresentam influência na rugosidade da superfície, embora o avanço apresente maior influência na rugosidade que a velocidade de corte.

A título de exemplo, a Figura 4.16 ilustra a rugosidade média aritmética (R_a) na parede de um furo para um material compósito de matriz epóxida reforçado a fibras de carbono em função dos parâmetros processuais. Verifica-se que para velocidades de corte elevadas e baixos avanços a rugosidade media aritmética diminui, ou seja, obtém-se bom acabamento de superfície.

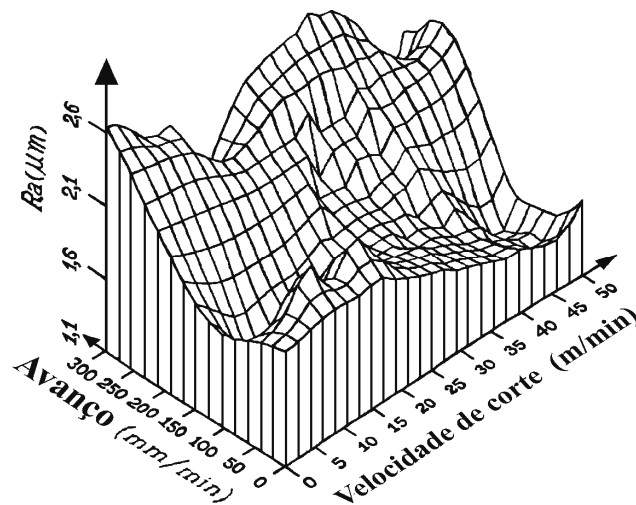


Figura 4.16 – Relação entre a rugosidade média aritmética (R_a) e os parâmetros processuais [Hocheng et al., 1992]

El-Sonbaty et al., 2004 relacionaram os parâmetros processuais (V_c e a) com o acabamento de superfície na parede do furo, e verificaram que a rugosidade média aritmética (R_a) diminui com a velocidade de corte e aumenta com o avanço conforme se observa pela Figura 4.17.

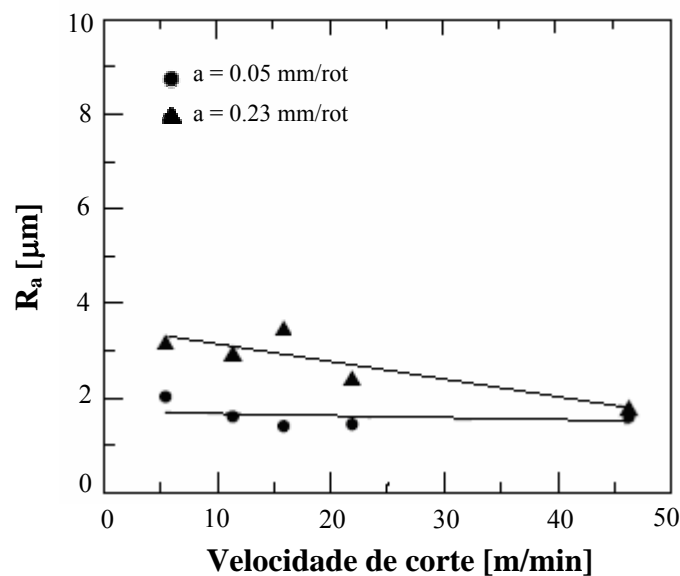


Figura 4.17 – Rugosidade media aritmética em função dos parâmetros processuais [El-Sonbaty et al., 2004]

Metodologia Experimental

Tendo em consideração o âmbito do trabalho, a metodologia experimental foi delineada e executada com o intuito de estudar a furação de materiais compósitos, considerando aspectos relativos ao processo de corte (*forças de corte*) e à qualidade obtida no furo (*acabamento de superfície e defeito de delaminação à entrada e/ou saída do furo*). Foi tomada em consideração a influência dos parâmetros processuais (*velocidade de corte, V_c e avanço, a*), a geometria da ferramenta de corte, bem como os materiais compósitos a maquinar.

Neste capítulo são descritos os materiais compósitos, ferramentas de corte, equipamentos e parâmetros de corte utilizados bem como a metodologia de análise da furação dos materiais compósitos, ou seja, a medição das forças de corte, do defeito de delaminação à entrada e/ou saída do furo e do acabamento de superfície da parede do furo.

5.1 Materiais Compósitos

A escolha dos materiais compósitos recaiu sobre os compósitos de matriz polimérica, visto que estes se encontram em crescente utilização em variedíssimos campos de aplicação da ciência e da engenharia, nomeadamente, na aeronáutica, na aeroespacial, na biomecânica, na electrónica e na mecânica, devido às suas propriedades específicas.

Os compósitos de matriz polimérica, normalmente designados por plásticos reforçados com fibras (PRF), são materiais caracterizados por uma elevada resistência mecânica, rigidez e baixo peso. Como resultado das suas propriedades, apresentam melhor

desempenho, já testado e comprovado, ao nível estrutural que os materiais convencionais (*metálicos*), conduzindo à substituição gradual destes. Os compósitos poliméricos além de reduzirem os problemas de fadiga, normalmente inerentes aos materiais convencionais, possibilitam uma maior flexibilidade de concepção e fabrico de componentes estruturais. Deste modo, foram seleccionados dois tipos de materiais compósitos de matriz polimérica, um compósito laminado reforçado a fibra de carbono e um compósito reforçado a fibra de vidro para a realização dos ensaios de furação.

O compósito laminado apresenta uma matriz termoendurecível, nomeadamente resina epóxida reforçada com 55% de fibras de carbono, com 3mm de espessura. O compósito laminado foi produzido no Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI[®]) e obtido através do processo Autoclave. Apresenta 13 camadas de fibras alternadas, trama de 2x2, com uma orientação de 0 e 90°, conforme se observa na Figura 5.1.

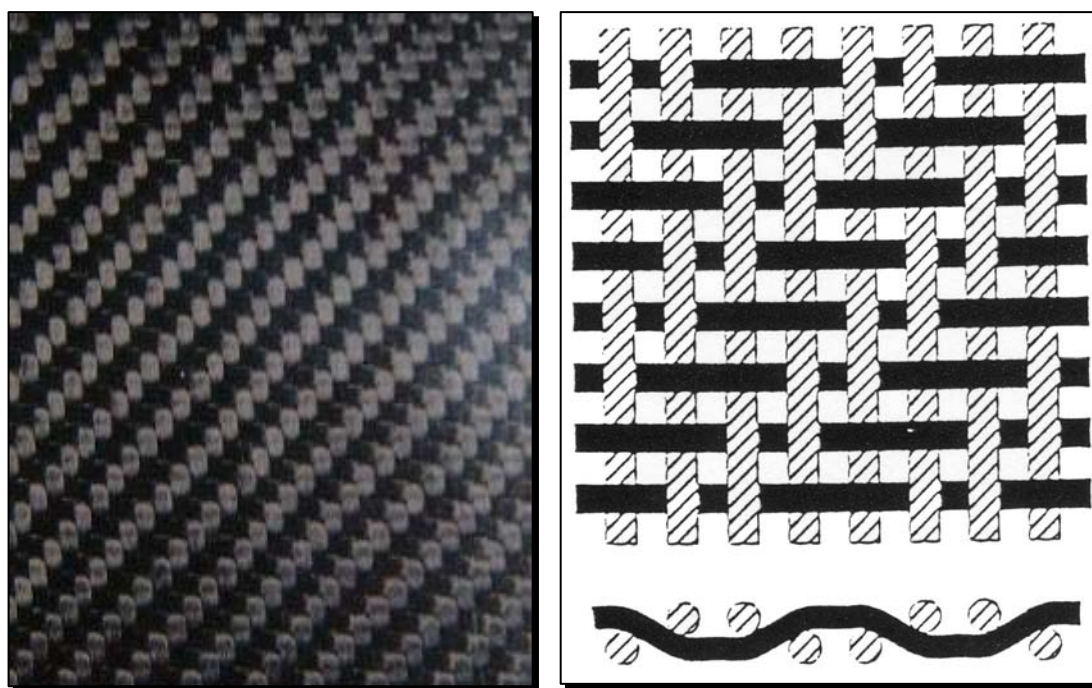


Figura 5.1 – Compósito laminado reforçado com 55% de fibras de carbono alternadas, 2x2, com uma orientação de 0 e 90°

Na Tabela 5.1 apresentam-se as principais propriedades mecânicas e térmicas do compósito laminado reforçado com 55% de fibras de carbono.

Tabela 5.1 – Propriedades mecânicas e térmicas do compósito laminado reforçado com 55% de fibras de carbono [INEGI®]

Propriedades	Valor	Unidade
Módulo de Elasticidade	130	GPa
Resistência à tracção	2000	MPa
Resistência à compressão	626	MPa
Coefficiente de expansão térmica	-1.5	10 ⁻⁶ /K

Os compósitos laminados reforçados a fibras de carbono apresentam especial atracção para aplicações na indústria aeroespacial, nomeadamente em motores de caixa de propulsão, “flaps”, asas e cauda do avião, e na indústria automóvel em chassis, revestimentos do motor, painéis, entre outros.

O compósito reforçado a fibra de vidro apresenta também uma matriz termoendurecível, a resina polyester reforçada com 65% de fibras de vidro. No entanto, foram seleccionados diferentes tipos de resinas de polyester insaturado, nomeadamente, a resina bisfenólica (*ATLAC 382-05*) e a ortoftálica (*Viapal VUP 9731*), mantendo a mesma percentagem de reforço do material compósito. Ambas as resinas derivam do polyester insaturado, contudo apresentam matérias-primas básicas diferentes, ou seja, enquanto a resina ortoftálica *Viapal VUP 9731* apresenta diácidos (*ácido ortoftálico*) na sua molécula, a resina bisfenólica *ATLAC 382-05* apresenta glicóis (*bisfenol A*) na sua molécula. O facto de o material compósito apresentar diferentes tipos de resinas conduz a aplicações distintas. A resina bisfenólica apresenta excelente resistência a ácidos, alcalóides, soluções alcalinas, e água, sendo indicada para o fabrico de componentes que estejam sujeitos a condições desfavoráveis, como por exemplo, reservatórios de combustível, reservatórios e condutas de água, tubagens, enquanto a resina ortoftálica é aplicada em situações menos agressivas.

Na Figura 5.2 podemos observar os compósitos de diferentes tipos de resinas de polyester reforçadas com 65% de fibras de vidro.

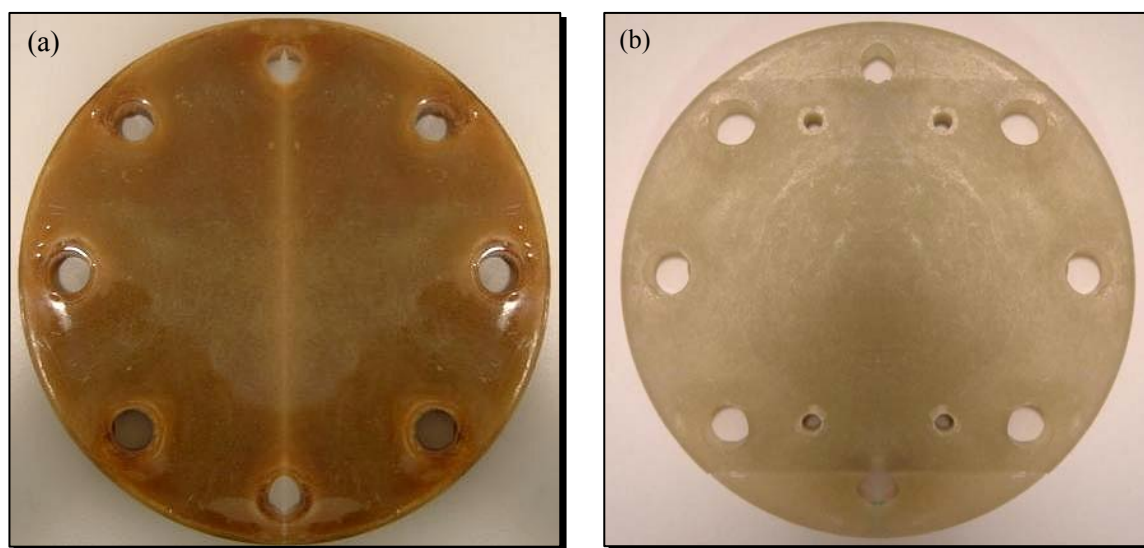


Figura 5.2 – Compósitos reforçados com 65% de fibras de vidro (a) resina bisfenólica, ATLAC 382-05, e (b) resina ortoftálica, Viapal VUP 9731

Os compósitos foram produzidos pelo Centro Industrial de Estratificados de Vidro, Lda (Vidropol[®]) e obtidos por moldação manual. Apresentam uma geometria circular com um diâmetro de 200mm e uma espessura de 22mm.

Na Tabela 5.2 apresentam-se as principais propriedades mecânicas e térmicas dos materiais compósitos de matriz polyester reforçados com 65% de fibras de vidro, de acordo com o fabricante [Vidropol[®]]. Através desta, podemos verificar que o compósito de resina ortoftálica, *Viapal VUP 9371*, apresenta, de um modo geral, propriedades mecânicas superiores quando comparadas com o compósito de resina bisfenólica, *ATLAC 382-05*. No entanto, relativamente às propriedades térmicas verifica-se o oposto.

Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas e térmicas dos materiais compósitos de matriz polyester reforçados com 65% de fibras de vidro [Vidropol®]

Propriedades	Viapal VUP 9731	ATLAC 382-05	Unidade
Resistência à flexão (DIN EN 63)	480	380	N/mm ²
Módulo de Elasticidade (DIN 53457)	26470	25275	N/mm ²
Resistência à tracção (DIN EN 61)	480	404	N/mm ²
Resistência à compressão (DIN 53454)	196	145	N/mm ²
Extensão (DIN EN 61)	1.7	1.3	%
Resistência ao impacto (DIN 53453)	150	190	kJ/m ²
Temperatura (DIN 53458)	200	240	°C
Condutividade térmica (DIN 52612)	0.15	0.22	W/m°C

5.2 Ferramentas de Corte

Tendo em consideração que a maquinagem de materiais compósitos requer ferramentas de corte com elevada resistência ao desgaste e, em particular à abrasão, a primeira escolha recai sobre as ferramentas de diamante policristalino (PCD) devido à sua elevada dureza, leia-se elevada resistência ao desgaste abrasivo, e condutibilidade térmica. As ferramentas de PCD são recomendadas para a maquinagem de grandes séries de peças em ligas de alumínio e materiais extremamente abrasivos, servindo de exemplo os compósitos de matriz metálica (CMM), materiais cerâmicos e plásticos reforçados a fibras de vidro (PRFV). No entanto, apresentam como principal desvantagem o seu elevado custo, comprometendo deste modo a sua vasta utilização e a sua aplicação em produção unitária ou pequenas séries de peças [Edwards, 1993; Groover, 1996; Low and Li, 1996].

Como segunda escolha, surge a classe de material mais utilizada na indústria, o metal duro (*carbonetos sinterizados*), devido à excelente combinação entre as suas propriedades mecânicas, nomeadamente, a dureza, resistência ao desgaste e tenacidade. Tendo em conta o material a maquinar e os parâmetros de corte pretendidos foi seleccionado como material da ferramenta de corte o carboneto de tungsténio (WC) com 10% de cobalto (Co). De acordo com a norma ISO R513, corresponde a um carboneto sinterizado K10, em que confere uma elevada dureza e resistência ao desgaste, e uma tenacidade adequada à

ferramenta de corte. As ferramentas de carbonetos de tungsténio (WC-Co), apesar de apresentarem uma vida útil relativamente curta quando comparada com a das ferramentas de diamante policristalino (PCD), são recomendadas para a maquinagem de materiais plásticos reforçados [Edwards, 1993; Groover, 1996].

Na Tabela 5.3 apresenta-se a composição química e as principais propriedades físicas, mecânicas e térmicas do metal duro, carboneto de tungsténio, seleccionado para as ferramentas de corte [Edwards, 1993; Brookes, 1996; Groover, 1996; Low and Li, 1996]

Tabela 5.3 – Propriedades físicas, mecânicas e térmicas do carboneto sinterizado (WC-Co) utilizado nos ensaios

Composição química [%]		Propriedades Físicas, Mecânicas e Térmicas				
WC	Co	Densidade [g/cm ³]	Dureza Vickers [MPa]	Tensão de rotura transversal [MPa]	Módulo de Young [GPa]	Coefficiente de expansão térmica (x10 ⁻⁶ /K)
90	10	14.55	1500-1550	2800-3100	6	5.0

Na Figura 5.3 podemos observar as ferramentas de corte (*brocas*), de carboneto sinterizado (K10) sem revestimento, seleccionadas para a furação dos materiais compósitos

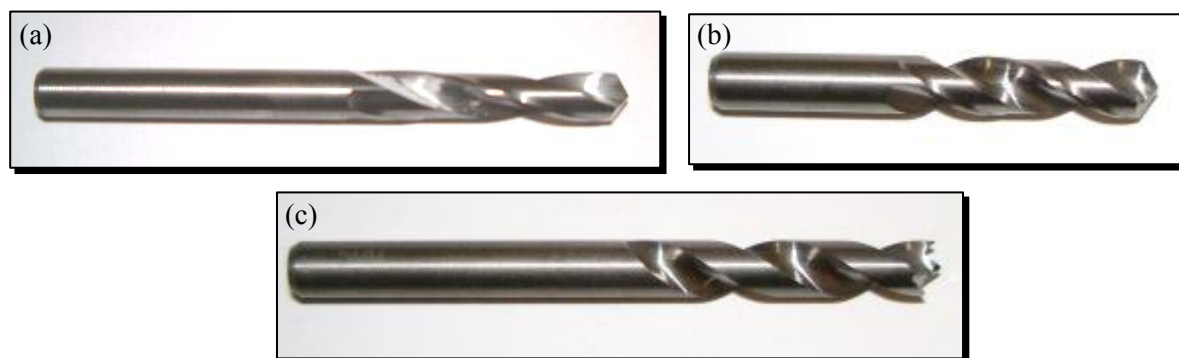


Figura 5.3 – Ferramentas de corte de carboneto sinterizado (K10), seleccionadas para a furação dos materiais compósitos (a) Broca helicoidal “*Stub Length*”, (b) Broca helicoidal “*Straight shank*” e (c) Broca “*Brad & Spur*”

As ferramentas de corte com diferentes geometrias, fornecidas pela empresa *M.A. Ford®-High Performance Cutting Tools*, apresentam um diâmetro de 5mm de acordo com a norma DIN 6539.

As brocas de geometria helicoidal, “*Stub Length*” (Ref.^a 22619680) e “*Straight Shank*” (Ref.^a 30019600) apresentam ângulo de ponta de 118°, ângulo de hélice de 22°, comprimento de aresta de corte de 26 e 195 mm e comprimento total de 62 e 38mm, respectivamente. A broca helicoidal “*Stub Length*”, de acordo com o fabricante, apresenta um chanfro curto que reduz a vibração e a deflexão, e conduz ao aumento da precisão do furo e da vida da ferramenta. Esta broca é indicada para a furação em geral de plásticos reforçados a fibras (PRF). A broca helicoidal “*Straight Shank*” é uma ferramenta do tipo curto indicada para a furação de materiais compósitos, em especial, laminados reforçados a fibras de carbono, vidro.

A broca “*Brad & Spur*” (Ref.^a 20719680) apresenta uma geometria especial, onde possui três pontos de ataque à superfície, um comprimento de aresta de corte de 25.5mm e um comprimento total de 57mm, conforme se observa na Figura 5.3. De acordo com o fabricante, esta geometria é indicada para a furação, em geral, de materiais compósitos reforçados por fibras de carbono, vidro ou aramida dado que conduz a um defeito de delaminação mínimo ou inexistente na superfície.

5.3 Centro de Maquinagem

Os ensaios de furação foram realizados no Centro de Maquinagem *MIKRON VCE 500®*, Figura 5.4, instalado no Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro. O centro de maquinagem apresenta uma potência máxima de 11kW, uma velocidade de rotação máxima de 7500rpm., um controlador HASS e um armazém com capacidade para 20 ferramentas de corte.



Figura 5.4 – Centro de maquinagem MIKRON VCE 500® utilizado nos ensaios de furação.

Na Tabela 5.4 apresentam-se as principais características do equipamento utilizado, o centro de maquinagem, *MIKRON VCE 500*®, de acordo com o fabricante.

Tabela 5.4 – Características principais do Centro de Maquinagem “MIKRON VCE 500”²⁴

Características	
Controlador	HASS
Velocidade máxima de rotação	7500 rpm.
Potência máxima	11 kW
Velocidade máxima de avanço	7600 mm/min
Dimensões de trabalho X,Y,Z	508 x 406 x 508 mm
Movimentos rápidos, X,Y,Z	18 m/min
Repetitibilidade	$\pm 2.5 \mu\text{m}$
Precisão	$\pm 5 \mu\text{m}$
Número de eixos standard	3
Sistema de fixação de ferramentas na árvore	Cone ISO 40/BT 40
Capacidade do armazém de ferramentas	20
Diâmetro máximo da ferramenta	89 mm
Carga máxima sobre a mesa de trabalho	1350 Kg
Tempo de troca da ferramenta	8 s
Velocidade de processamento	400 blocos/s
Peso	3100 Kg

5.4 Parâmetros Processuais

Os parâmetros processuais (V_c e a) foram seleccionados tendo em consideração a literatura consultada e as recomendações do fabricante [*M.A. Ford® - High Performance Cutting Tools*], por forma a avaliar a furação dos materiais compósitos, ao nível do processo de corte, do defeito de delaminagem e do acabamento de superfície.

Numa primeira fase foram efectuados ensaios de furação no material compósito laminado reforçado a fibra de carbono. Numa segunda fase, procedeu-se à realização dos ensaios de furação no material compósito reforçado a fibras de vidro.

Na Tabela 5.5 apresentam-se os parâmetros processuais utilizados nos ensaios de furação para ambos os materiais compósitos.

²⁴ www.mikron-ac.com/

Tabela 5.5 – Parâmetros processuais utilizados nos ensaios de furação dos materiais compósitos

Velocidade de corte (V_c) [m/min]	Avanço (a) [mm/rot]	Profundidade do furo [mm]
Compósito laminado reforçado a fibras de carbono		
30 (1910 rpm)	0.05	3 (passante)
40 (2547 rpm)	0.1	
50 (3183 rpm)	0.2	
Compósito reforçado a fibras de vidro		
55 (3500 rpm)	0.05	15 (cego)
71 (4500rpm)	0.1	
86 (5500 rpm)	0.2	

5.5 Avaliação do Processo de Furação

A avaliação da furação dos materiais compósitos foi efectuada tendo em consideração o processo de corte e a qualidade do furo obtido. Deste modo, a análise experimental passa pela medição das forças de corte, do acabamento de superfície e do defeito de delaminação no furo.

5.5.1 Forças de Corte

Conforme mencionado no Capítulo 2, secção 2.3.1.2, as forças aplicadas na broca são compostas pela força de avanço (F_z), força radial (F_r) e o binário (M_z). A medição e a aquisição das componentes da força (F_r e F_z) e binário (M_z), no processo de furação, geralmente, são efectuadas através de um sistema de medida que contempla um dinamómetro, um amplificador de carga e o respectivo sistema de aquisição de dados.

5.5.1.1. Dinamómetro Piezoeléctrico

O dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9272 ilustrado na Figura 5.5, utiliza as propriedades eléctricas dos cristais de quartzo, que geram um sinal de carga eléctrica proporcional à força aplicada quando sujeito a cargas mecânicas, para efectuar a medição das três componentes ortogonais da força (F_x , F_y e F_z) e do binário (M_z). Este caracteriza-se

pela capacidade e versatilidade de efectuar a leitura dinâmica e quasi-estática das quatro componentes, (F_x , F_y , F_z e M_z) em diversas operações de maquinagem (*furação, fresagem, torneamento e rectificação*). É distinguido por apresentar uma elevada rigidez, tendo como consequência uma frequência natural elevada (*cristais de quartzo*), uma sensibilidade linear livre de histerese, uma gama de medição ampla, fácil manuseamento e encontra-se protegido contra a acção dos fluídos de corte, de acordo com a norma internacional DIN 40050. A sua elevada resolução possibilita a leitura da mais pequena alteração dinâmica nas componentes ortogonais da força (*forças de corte*) e momento [Kuratle and Signer, 1999; Bill et al., 2002; Kumme et al., 2003a].



Figura 5.5 – Dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9272²⁵

O dinamómetro piezoeléctrico que permite medir as três componentes ortogonais da força (F_x , F_y , F_z) e o binário (M_z) é constituído por duas placas circulares de aço inoxidável e um sensor de medida das quatro componentes que se encontra no núcleo. A força e o momento (M_z) que actuam no dinamómetro são transmitidos através da placa circular superior para o sensor de medida das quatro componentes (F_x , F_y , F_z e M_z) [Kuratle and Signer, 1999; Childs et al., 2000; Bill et al., 2002].

²⁵ www.kistler.com

O sensor de medida é constituído por três pares de anéis de cristais de quartzo, sendo um par sensível à pressão (F_z - *Força de avanço*) e os dois pares restantes sensíveis ao corte na direcção x e y, respectivamente. Quando aplicada a força, esta é decomposta nas suas três componentes. Adicionalmente, é colocado um conjunto de anéis de quartzo de modo a que o eixo sensível ao corte seja tangencial ao círculo disposto no sensor, de forma a gerar um sinal eléctrico proporcional ao binário (M_z) [Kuratle and Signer, 1999; Bill et al., 2002].

Na Figura 5.6 observa-se o princípio de funcionamento do dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9272, respectivamente.

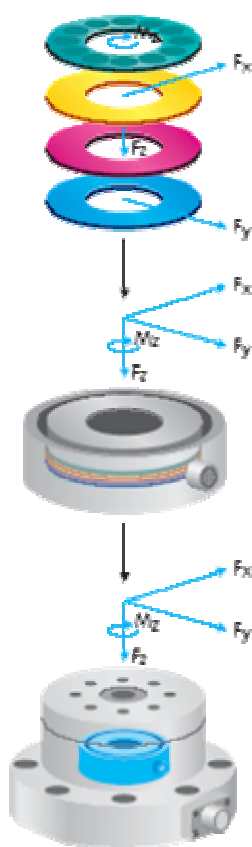


Figura 5.6 – Princípio de funcionamento do dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9272²⁶

Na Tabela 5.6 apresentam-se, em resumo, as principais características do dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9272 empregue nos ensaios de furação.

²⁶ www.kistler.com - Cutting Force Measurement -Precise measuring systems for improvement in metal-cutting - Kistler Instrumente AG, SD-300-400e-01.04, 2004

Tabela 5.6 – Principais características do dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9272 utilizado nos ensaios²⁷

Características	Componentes	Unidades	Valor
Gama de medida	Fx, Fy	kN	-5...5*
	Fz	kN	-5...20**
	Mz	N.m	-200...200
Gama parcialmente calibrada	Fx, Fy	N	0...500
	Fz	N	0...2000
	Mz	N.m	-20...20
“Threshold”	Fx, Fy	N	< 0.02
	Fz	N	< 0.02
	Mz	N.m	< 0.02
Sensibilidade	Fx, Fy	pC/N	≈ -7.6
	Fz	pC/N	≈ -3.8
	Mz	pC/N.cm	≈ -1.6
Linearidade	Fx, Fy		
	Fz	%FSO	≤ ± 1
	Mz		
Sensibilidade Transversal	Fx↔Fy	%	≤ ± 2
	Fz→Fx,y	%	≤ ± 1
	Fx,y→Fz	%	≤ ± 2
	Fz→Mz	Ncm/N	≤ ± 0.02
	Fx,y→Mz	Ncm/N	≤ ± 0.07
	Mz→Fz	N/Ncm	≤ ± 0.01
	Mz→Fx,y	N/Ncm	≤ ± 0.005
Histerese	Fx, Fy		
	Fz	%FSO	≤ 1
	Mz		
Rigidez linear	Fx, Fy	kN/μm	≈ 0.4
	Fz	kN/μm	≈ 2
	Mz	N.m	≈ 70
Frequência natural	f ₀ (x,y)	kHz	≈ 4
	f ₀ (z)	kHz	≈ 7
	f ₀ (Mz)	kHz	≈ 5
Gama de temperatura		°C	0...70
Tipo Protecção		DIN 40050	IP67
Peso		kg	4.2

* ponto de aplicação da força no centro a uma altura máxima de 25 mm

** ponto de aplicação da força < 20 mm do centro

²⁷ www.kistler.com - Cutting Force Measurement -Precise measuring systems for improvement in metal-cutting - Kistler Instrumente AG, SD-300-400e-01.04, 2004

No que respeita à gama de calibração do dinamómetro, esta foi efectuada de acordo com as curvas de calibração recomendadas pelo fabricante Kistler Instrument AG [Kumme *et al.*, 2003b].

A gama de calibração original, considerando a carga aplicada no centro do dinamómetro, está estabelecida para a seguinte gama de forças, $F_x = 0$ a 5000 N, $F_y = 0$ a 5000 N, $F_z = 0$ a 20000 N e binário $M_z = \pm 20000$ N.cm. No entanto, tendo em conta o material a maquinar, foi escolhida a gama de calibração fina, $F_x = 0$ a 500 N, $F_y = 0$ a 500 N, $F_z = 0$ a 2000 N e $M_z \pm 2000$ N.cm.

Nas Figuras 5.7 e 5.8 podemos observar as curvas de calibração, para as três componentes da força (F_x , F_y e F_z) e para o binário (M_z), respectivamente.

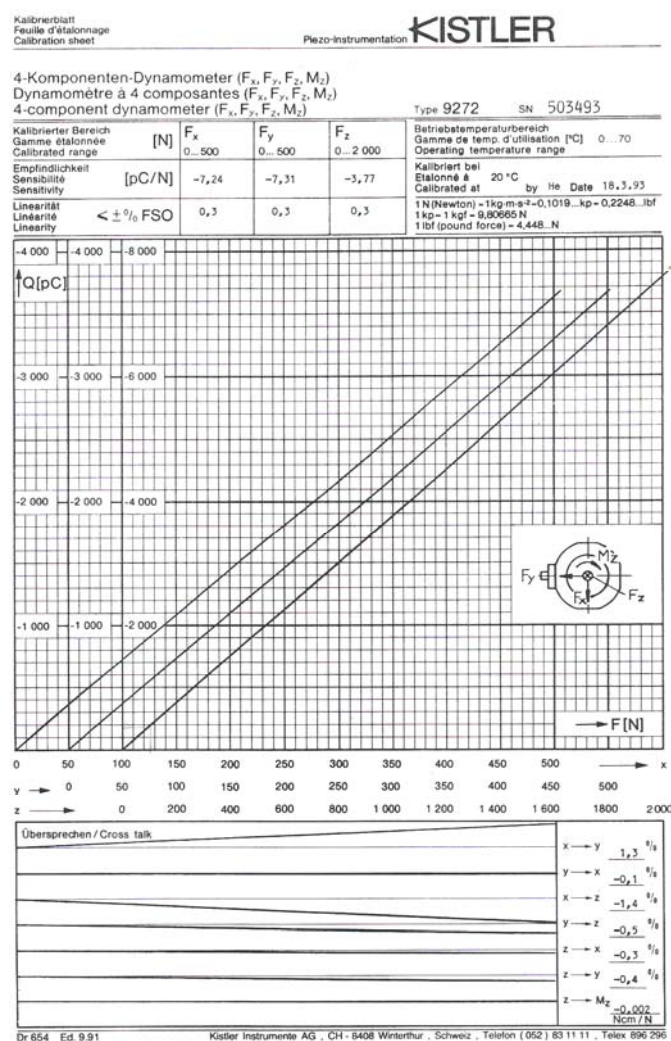


Figura 5.7 – Curva de calibração das três componentes da força (F_x , F_y e F_z) do dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9272 utilizado nos ensaios de furação

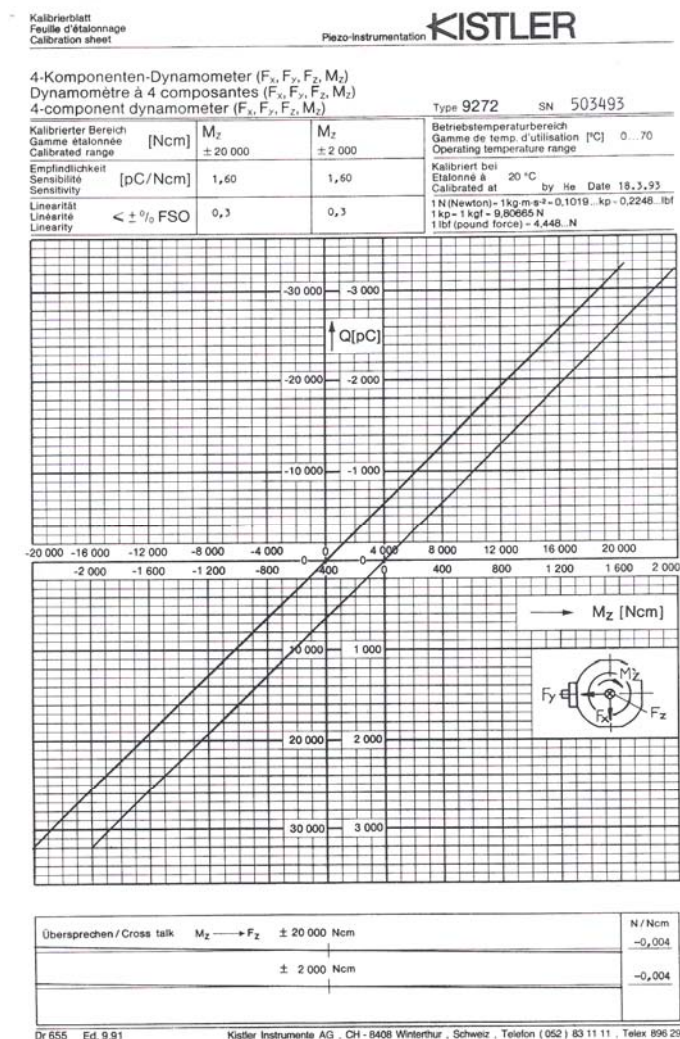


Figura 5.8 – Curva de calibração do binário (M_z) do dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9272 utilizado nos ensaios de furação

Para além das referidas curvas de calibração, podemos também observar nas Figuras 5.7 e 5.8 as seguintes características: a sensibilidade, a linearidade e a sensibilidade transversal.

5.5.1.2. Amplificador de Carga

O condicionamento de sinal é extremamente importante quando se efectua a leitura de grandezas físicas, leia-se mecânicas, como forças de corte, binário, tensões, etc. Deste modo, é dada especial atenção à estabilidade e ao isolamento dos diversos componentes individuais, seja contra líquidos de corte, ou outro tipo de contaminação.

Em virtude de os sensores piezoeléctricos produzirem um sinal de carga eléctrica, o qual varia linearmente com a força aplicada no sensor, torna-se necessário converter o sinal de

carga em sinal de tensão (5V ou 10V) ou corrente (4 a 20mA) de forma a permitir a aquisição dos dados.

A aplicação do amplificador de carga no sistema de medida permite converter o sinal de carga em sinais de tensão ou corrente, que posteriormente são avaliados através de processamento de sinal. Em virtude das várias exigências por parte da indústria, a Kistler® oferece uma gama ampla de amplificadores de carga, que variam em termos de construção, número de canais, precisão, escala de medida, sensibilidade, largura de faixa e características do filtro, permitindo uma análise facilitada dos sinais.

No que diz respeito ao amplificador de carga, foi escolhido o modelo 5019A, fornecido também pela empresa Kistler®, dado que, para além de apresentar como principal aplicação a medição de forças de corte utilizando dinamómetros piezoeléctricos, permite que o seu controle seja efectuado através dum computador. O amplificador de carga foi projectado de acordo com o grau de protecção IP-20, ou seja em ambientes fechados e secos, de acordo com a norma internacional DIN 40050 e respeita as normas de segurança, EN 61010-1.

Na Figura 5.9 podemos observar o amplificador de carga de três canais Kistler® 5019A utilizado no sistema de medida.



Figura 5.9 – Amplificador de carga de três canais, Kistler® 5019A, utilizado no sistema de medida

Os parâmetros de calibração, nomeadamente, a sensibilidade, a gama de medida, o tipo de filtro e a constante de tempo, os protocolos de comunicação podem ser introduzidos através das teclas existentes no painel de controlo e visualizados através do mostrador LCD, ou através de interfaces do tipo IEEE-488 ou RS - 232C.

Os sinais de carga eléctrica das componentes da força (F_x , F_y e F_z) e do binário (M_z) provenientes do dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9272, são introduzidos no amplificador de carga através dum cabo coaxial, e posteriormente convertidos em sinais proporcionais de tensão.

Na Tabela 5.7 apresentam-se, em resumo, as principais características do amplificador de carga Kistler® 5019A, empregue no sistema de medida das forças de corte.

A ligação entre o dinamómetro piezoeléctrico e o amplificador de carga foi efectuada através do cabo coaxial, modelo 1677A5, fornecido pela empresa Kistler®. Este cabo, além de cumprir todos os requisitos no que diz respeito à resistência de isolamento, capacidade e gama de temperatura, encontra-se isolado e protegido através de um revestimento metálico que garante uma comunicação livre de interferências entre os equipamentos.

Tabela 5.7 – Principais características do amplificador de carga Kistler® 5019A utilizado no sistema de medida²⁸

Características		Unidade	Valor
Número de canais			3
Gama de medida		pC	$\pm 10 \dots 999000$
Sensibilidade		pC/M.U.	$0.01 \dots 9990$
Escala		M.U./ V	$0.001 \dots 9990000$
Frequência		kHz	$\approx 0 \dots 200$
Corrente de saída		mA	$0 \dots \pm 5$
Voltagem de saída		V	± 10
Impedância de saída		Ω	10
Filtro Passa Baixo		kHz	$0.01 \dots 30 (\pm 10\%)$
Constante de tempo	Longa		DC-Mode
	Media	s	$1 \dots 10000$
	Curta	s	$0.01 \dots 100$
Linearidade		%	$< \pm 0.05$
Precisão	$\leq \pm 99.9 \text{ pC Fs}$	%	$\leq \pm 3$
	$\geq \pm 100 \text{ pC Fs}$	%	$\leq \pm 1$
Gama de operação		°C	$-10 \dots 60$
Interface	Série		RS-232C (V24)
	Paralela		IEEE-488-1978
Dimensões		mm	$340 \times 187 \times 280$
Peso		kg	8

M.U.- Mechanical unit

5.5.1.3. Software de Aquisição de Dados

O *DynWare Software Data Acquisition, modelo 2825A1-1.10*, desenvolvido pela empresa Kistler, é um software de aquisição e processamento de dados específico para a medição de

²⁸ www.kistler.com - Multichannel Charge Amplifier 5019B, Kistler Instrumente AG, SD - 5019B_000-298m-11.04, 2004 and Cutting Force Measurement -Precise measuring systems for improvement in metal-cutting - Kistler Instrumente AG, SD-300-400e-01.04, 2004

forças de corte utilizando dinamómetros piezoelétricos. O *DynoWare* permite a visualização das componentes da força (F_x , F_y e F_z) e binário (M_z) e a transferência dos dados adquiridos (código ASCII) para qualquer tipo de software de tratamento de dados (Excel, etc) após o término do ensaio.

O software em questão, *DynoWare*, apresenta as seguintes vantagens²⁹:

- ☐ fácil utilização;
- ☐ configuração e controlo dos equipamentos de medição através de interface RS-232C e IEEE-488;
- ☐ software indicado para a aquisição e avaliação de grandezas físicas;
- ☐ avaliação útil do sinal e funções do cálculo;
- ☐ grava em simultâneo 8 canais de medida.

Para a análise do sinal, o *DynoWare* oferece uma visualização do processo juntamente com funções úteis do cálculo e gráficos. Além da configuração dos instrumentos de medição, o software suporta documentação individual de medida, juntamente com o armazenamento de dados da configuração e de dados medidos. A avaliação do sinal permite também a compensação de ruído indesejável no sinal.

5.5.1.4. Sistema de Aquisição das Forças de Corte

A medição e a aquisição da força de avanço (F_z) e do binário (M_z), geradas no processo de furação, foi efectuada através do sistema de medida que contempla o dinamómetro piezoelétrico Kistler® 9272, o amplificador de carga Kistler® 5019A e o respectivo software de aquisição de dados, “*Dynoware*”, conforme se observa na Figura 5.10.

²⁹ www.kistler.com - DynoWare Type 2825A - Software for Data Acquisition and Evaluation SD- 000-371e-05.04, 2004



Figura 5.10 – Sistema de medida utilizado na medição e aquisição da força de avanço e binário no processo de furação (a) dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9272 (b) amplificador de carga Kistler® 5019A (c) software de aquisição de dados “Dynoware”

Na Tabela 5.8 apresentam-se, em resumo, os parâmetros de calibração de ambos os equipamentos, dinamómetro piezoeléctrico e amplificador de carga, utilizados na medição e aquisição da força de avanço (F_z) e binário (M_z) do processo de furação dos materiais compósitos. A taxa de aquisição de dados foi de 30 Hz com um tempo de medição variável, sendo este tempo função dos parâmetros processuais utilizados durante o ensaio.

Tabela 5.8 – Parâmetros de calibração (dinamómetro e amplificador de sinal) utilizados para a aquisição da força de avanço e binário na furação de materiais compósitos

Componentes	Sensibilidade do Transdutor [pC/N]	Gama de Calibração [kN]	Linearidade [$\leq \pm\%FSO$]	Filtro (Passa baixo) [Hz]	Constante de Tempo
F_z	-3.77	0 - 2	0.3	100	Longa
M_z	1.60	-2 - 2	0.3	100	Longa

5.5.2 Defeitos na Peça (Dano)

A furação é um processo imprescindível na maquinagem de materiais compósitos devido à necessidade de integração estrutural dos diversos componentes, no entanto, estes materiais podem ser facilmente danificados durante a sua maquinagem. Verifica-se que a furação de materiais compósitos é fortemente dependente dos parâmetros processuais (*velocidade de corte e avanço*), da geometria da ferramenta empregue e propriedades do material compósito. No entanto, é significativamente afectada pela tendência de estes materiais sofrerem defeitos quando sujeitos à acção de forças de corte, nomeadamente a força de avanço.

A delaminação, a deterioração da matriz e os defeitos de circularidade são alguns tipos de dano que ocorrem na furação de materiais compósitos. No entanto, a delaminação é considerada o tipo de defeito mais grave sofrido pelos compósitos laminados durante as operações de furação, dado que pode provocar uma diminuição significativa da resistência mecânica das peças conduzindo ao colapso prematuro das estruturas em serviço.

Na Figura 5.11 podemos observar o problema do defeito de delaminação por acção das forças de corte (*força de avanço e binário*) durante uma operação de furação num compósito laminado. A delaminação manifesta-se tanto na entrada, (*compressão das camadas*) como na saída (*tracção das camadas*) do furo do material compósito.

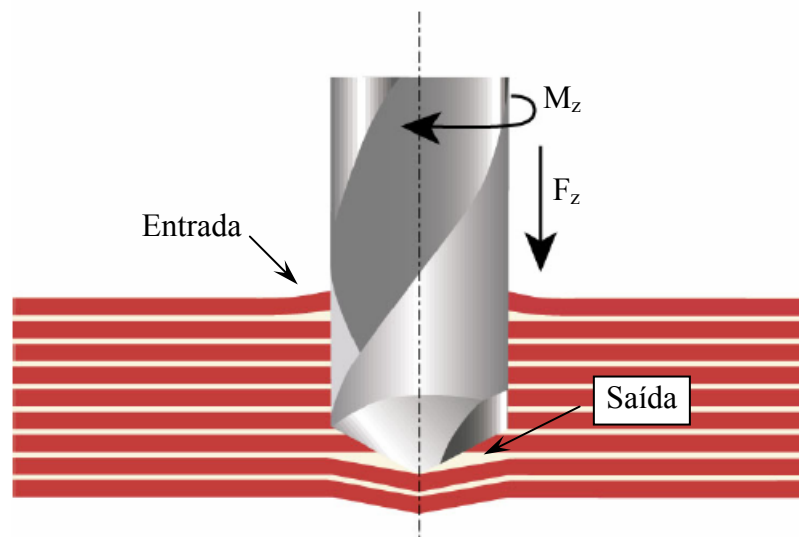


Figura 5.11 – Esquema do defeito de delaminação, entrada e saída, num compósito laminado durante a operação de furação.

A avaliação do material compósito após a operação de furação foi efectuada com recurso à microscopia óptica, método não destrutivo mais utilizado, para a detecção do defeito de delaminação.

O defeito de delaminação (*dano*) sofrido por ambos os materiais compósitos, Figura 5.12 e Figura 5.13, foi avaliado por microscopia óptica através do Microscópio Óptico *Mitutoyo TM – 500*, instalado no Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM), e caracterizado através do factor de delaminação (F_d). Este factor é determinado pela razão entre o diâmetro máximo com dano, D_{max} , e o diâmetro nominal do furo, D_{furo} [Chen, 1997].

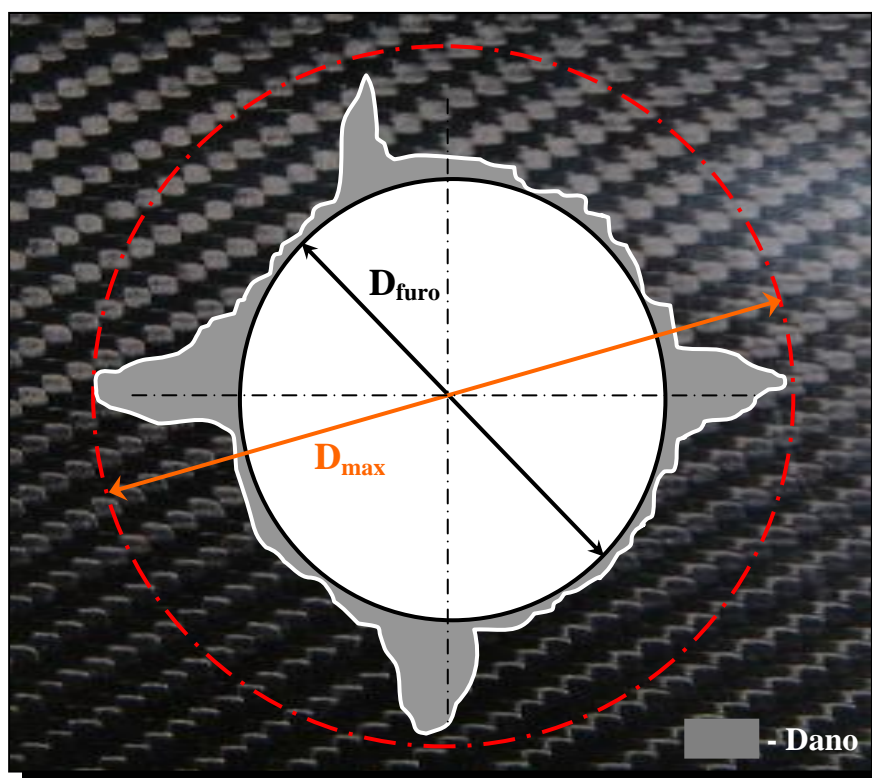


Figura 5.12 – Visualização do defeito de delaminação típico no compósito obtido pelo processo autoclave após a operação de furação

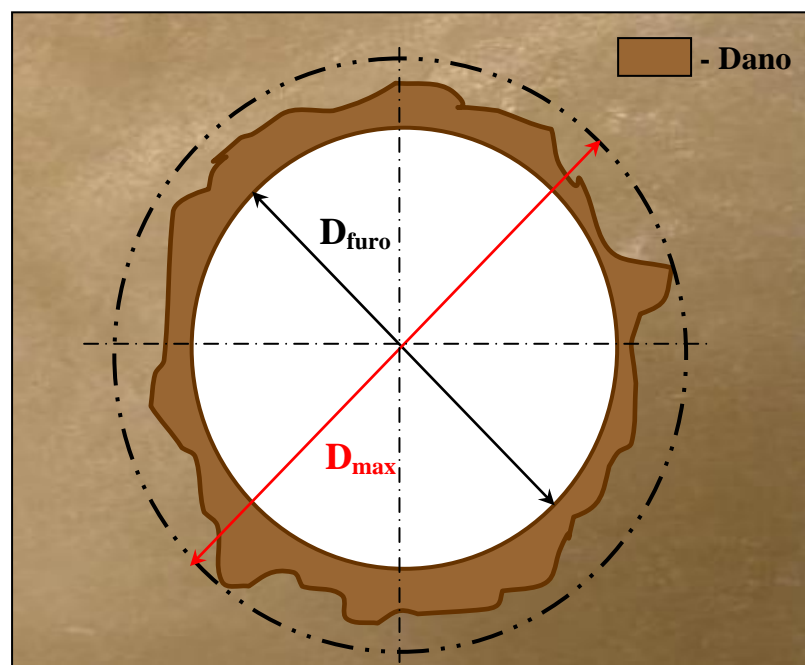


Figura 5.13 – Visualização do defeito de delaminação típico no compósito obtido pelo processo de moldação manual após a operação de furação

A medição rigorosa do diâmetro máximo do dano, D_{max} , foi efectuada através do Microscópio Óptico *Mitutoyo TM – 500*, Figura 5.14, com uma ampliação de 30X e uma solução de 1 μ m conforme se observa nas Figuras 5.12 e 5.13.

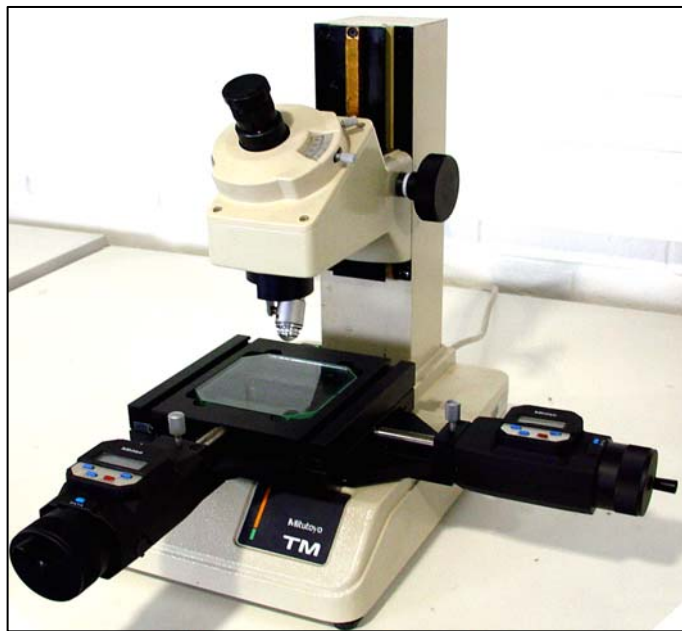


Figura 5.14 – Microscópio Óptico *Mitutoyo TM – 500* utilizado na medição do diâmetro máximo

Na Figura 5.15, é apresentado, a título de exemplo, o dano ocorrido na entrada e saída do material compósito laminado, utilizando uma velocidade de corte de 50m/min e um avanço de 0.2mm/rot.

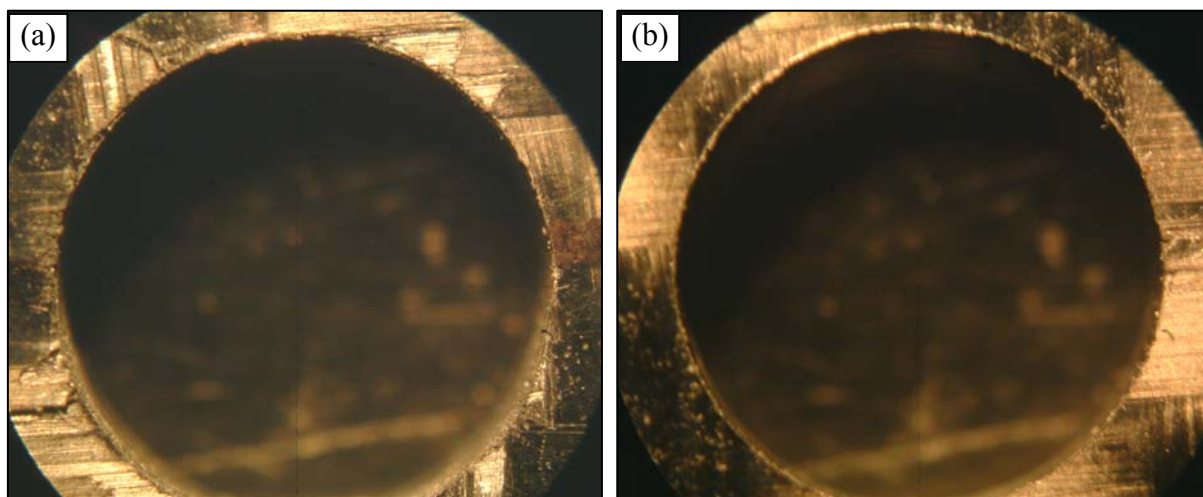


Figura 5.15 – Visualização do dano, após a operação de furação, no material compósito laminado para a (a) entrada e (b) saída do furo

5.5.3 Acabamento Superficial

Tal como a evolução das forças de corte e do dano, o acabamento de superfície obtido na peça, após a operação de maquinagem, é um critério importante na avaliação da maquinabilidade dos materiais.

As superfícies utilizadas em construção mecânica apresentam, geralmente, ao nível macroscópico um aspecto superficial óptimo, no entanto, a nível microscópico verifica-se a existência de defeitos microgeométricos que são determinantes para o comportamento dos componentes mecânicos. Toda a superfície, inclusivamente a que se apresenta lisa, possui rugosidade, em que a rugosidade não é mais que um conjunto de irregularidades, ou seja, pequenas saliências “picos” e reentrâncias “vales”, que caracterizam a superfície, em que esta desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos.

Qualquer que seja o processo de fabrico por arranque de apara, este induz defeitos microgeométricos na superfície, cuja amplitude é factor do rigor imposto na realização da mesma. As características intrínsecas ao processo de fabrico, as condições de corte, a geometria e as imperfeições associadas ao desgaste das ferramentas de corte, a dureza do material da superfície, sistema de fixação da peça, condicionam a textura da superfície.

Para as superfícies resultantes de processos de fabrico, a sua rugosidade depende directamente do processo em causa, em que o correcto funcionamento dos componentes está fortemente relacionado com o seu grau de rugosidade.

Para controlar a qualidade das superfícies obtidas, existem diversos meios disponíveis que vão desde processos ópticos, passando pela apalpação física e recentemente pela medição laser [Unver B., 1998; Wang, 2000; Unal et al., 2001].

A rugosimetria, com apalpador de agulha, é a técnica de caracterização mais empregue e divulgada na análise da microgeometria, leia-se acabamento de superfície. Permite obter a rugosidade da superfície real resultante das palpagens efectuadas sobre esta, caracterizando os defeitos ao nível dos parâmetros de amplitude e espaçamento.

A completa caracterização do acabamento de superfície contempla a análise de parâmetros de amplitude, de espaçamento e híbridos segundo a norma ISO/DIS 4287/1:1984. No entanto, os parâmetros de amplitude são considerados os mais importantes e vastamente empregues para a caracterização da topografia de grande parte das superfícies, entre os

quais se destacam, a rugosidade média aritmética (R_a) e a amplitude máxima do perfil de rugosidade (R_t). Antes de prosseguir é efectuada uma breve descrição dos parâmetros em questão.

A rugosidade média aritmética (R_a) corresponde à média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos pontos do perfil efectivo relativamente à linha média dentro do comprimento de medida (L_m), de acordo com a norma DIN 4768 e ISO 4287/1E. Definindo a função $y(x)$ como sendo a distância entre cada ponto do perfil e a linha média no comprimento de medida, L_m , (Figura 5.16) a rugosidade média aritmética é determinada através da expressão [Gadelmawla et al., 2002]:

$$R_a = \frac{1}{L_m} \int_0^L y(x) dx \quad (5.1)$$

sendo, L_m o comprimento de medida e y a distância entre dois pontos do perfil.

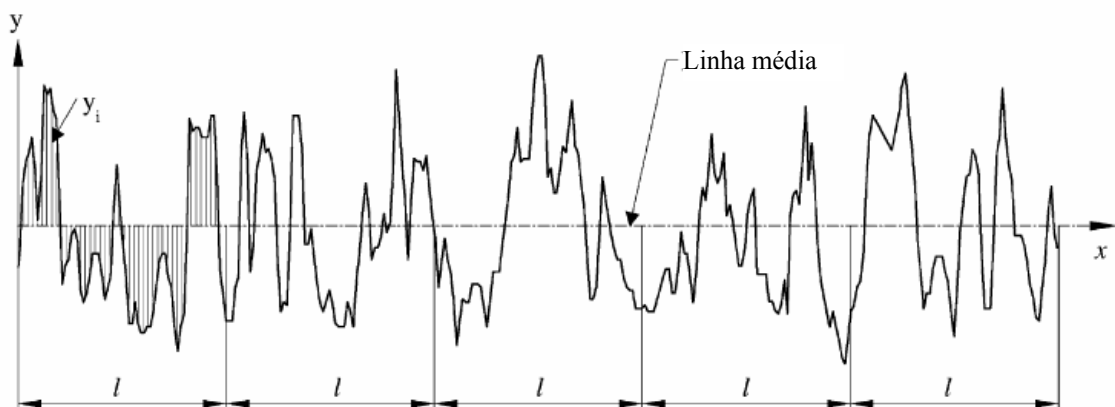


Figura 5.16 – Rugosidade média aritmética, R_a [Gadelmawla et al., 2002]

É, sem dúvida, o parâmetro de amplitude mais utilizado, sendo aplicável na maioria dos processos de fabrico. Porém, é um parâmetro que revela insensibilidade à presença de picos e vales atípicos, conduzindo à ocultação do defeito, dado que o valor da média não sofrerá grande alteração. Como tal, torna-se necessário proceder à análise de outros parâmetros de rugosidade.

A amplitude máxima do perfil de rugosidade (R_t), Figura 5.17, corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de medida (L_m).

Este parâmetro complementa informação relativamente ao parâmetro R_a , embora em alguns casos, a rigidez de avaliação conduza a resultados enganosos.

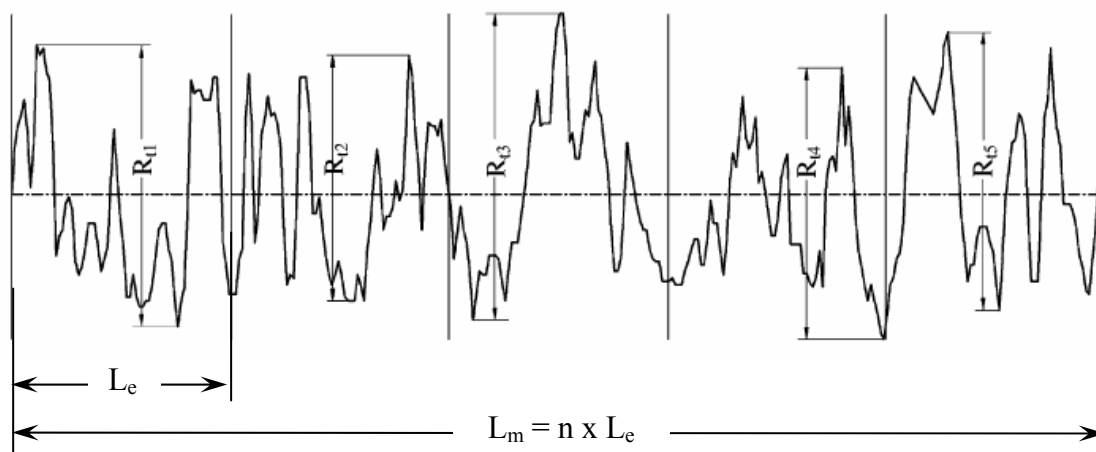


Figura 5.17 – Amplitude máxima do perfil de rugosidade R_i [Gadelmawla et al., 2002]

A análise do acabamento de superfície obtido nos furos dos materiais compósitos conduziu à utilização do rugosímetro de agulha, *HommelTester - T1000*, fabricado pela empresa *HommelWerke*[®], conforme se observa na Figura 5.18.

O rugosímetro de agulha é um aparelho de medida de classe 1 (μm) que permite a caracterização da textura das superfícies, sendo constituído por um apalpador de agulha (*Pick-up T1E*), uma unidade de controlo do apalpador (*LV15*), uma unidade de programação e medida (*Tester T1000*) e uma unidade de impressão (*Printer P1010*).

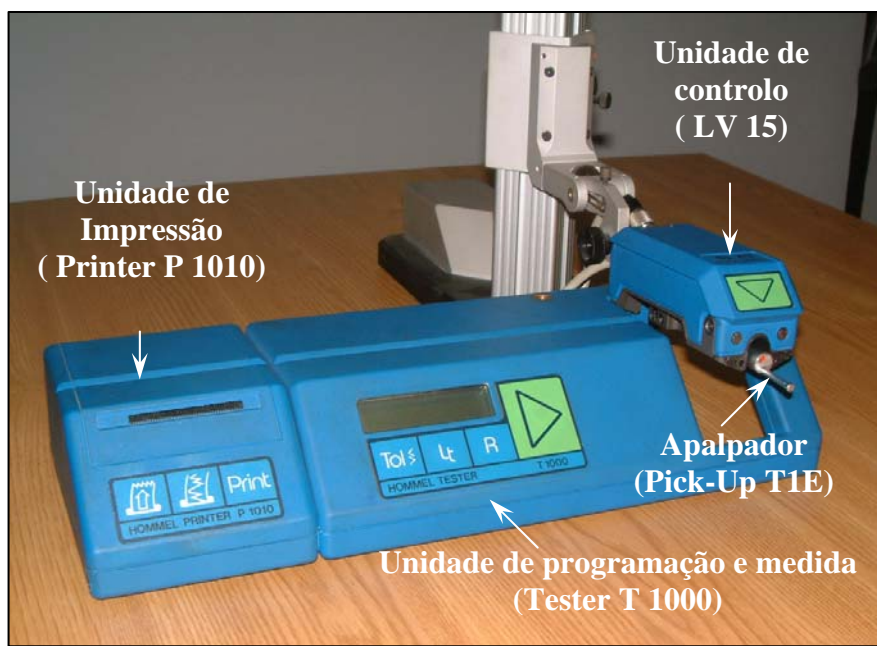


Figura 5.18 – Rugosímetro de agulha *HommelTester - T1000* utilizado na caracterização das superfícies

A unidade de programação e medida (*Tester T1000*) permite, entre outros aspectos, efectuar a programação manual e a medição dos diversos parâmetros pretendidos. Ao nível da programação permite a selecção dos parâmetros de rugosidade, comprimentos de medida, “*cut-off*”, selecção o tipo de filtro, gama de medida de rugosidade e tolerâncias dos parâmetros de rugosidade pretendidos para posteriormente se proceder à medição. Ao nível da medição permite efectuar o posicionamento e accionamento do apalpador, e a visualização dos valores dos parâmetros seleccionados.

Na Tabela 5.9 apresentam-se, em resumo, as principais características do rugosímetro de agulha, *HommelTester - T1000*, empregue na caracterização das superfícies.

Tabela 5.9 – Principais características do rugosímetro de agulha, *HommelTester - T1000*³⁰

Características	Unidade	Valor
Unidade de programação e medida - Tester T1000		
Gama de medida	µm	± 40
Comprimentos de pista	mm	1.5;4.8;15
Comprimentos de medida	mm	1.25;4.0;12.5
Cut-off	mm	0.25;0.8;2.5
Velocidade de medição	mm/s	0.15;0.5; 1
Velocidade de retorno	mm/s	2
Princípio de medida	Indutivo a 10 kHz	
Display	LCD - 8 dígitos	
Capacidade da bateria	1000 medidas	
Fonte de alimentação	V / A	18.5 / 0.5
Gama de temperatura	°C	5 a 40
Dimensões (comprimento x altura x largura)	mm	250 x 67x 128
Peso	g	1100
Unidade de controlo - LV15		
Comprimento de medida	mm	15
Tipo de medida	Longitudinal e transversal	
Deslocamento do apalpador	Motor corrente contínua	
Dimensões (comprimento x altura x largura)	mm	42 x 48 135
Peso	g	260
Apalpador de agulha - Pick Up T1E		
Gama de medida	µm	100
Raio da ponta de diamante	µm	5
Ângulo do apalpador	°	90
Diâmetro do apalpador	mm	3.5
Dimensões (diâmetro x comprimento)	mm	10 x 80
Peso	g	12
Unidade de impressão - Printer P 1010		
Papel	g/m ²	40-50
Tipo de Fita	carbono	
Caracteres/linha	16	
Resolução (vertical / horizontal)	mm	0.35
Fonte de alimentação	Via Tester T 1000	
Controlo	Teclas na unidade	
Dimensões (comprimento x altura x largura)	95 x 67 x 128	
Peso	g	450

³⁰ www.hommelwerke.de - HOMMEL TESTER T1000 – Technical specifications

Este equipamento permite também o controlo automático do rugosímetro através do software *Turbo DataWin*[®]. Este software, além de permitir efectuar a programação e medida dos parâmetros anteriormente referidos, possibilita a aquisição dos valores dos parâmetros, a visualização dos perfis de rugosidade, a obtenção das curvas de *Abbott-Firestone*, a realização de tratamento estatístico das medições obtidas (média, desvio padrão, amplitude, etc) e guarda toda a informação relativa às medições realizadas.

As superfícies maquinadas foram caracterizadas utilizando apenas parâmetros de amplitude, tendo sido escolhidos como parâmetros, a rugosidade média aritmética (R_a) e a amplitude máxima de rugosidade (R_t). Os valores dos parâmetros de rugosidade (R_a e R_t), foram obtidos através do rugosímetro de agulha *HommelTester - T1000*, de acordo com a norma ISO 4287/1.

A obtenção dos valores dos parâmetros de rugosidade foi efectuada utilizando um comprimento de base, designado por “*cut-off*” (L) de 0.8mm, de acordo com a Norma DIN 4768/4777, correspondendo a um comprimento de palpagem (L_t) de 4.8mm. Em cada superfície do furo maquinada foram efectuadas três medidas (palpagens) ao longo da superfície, sendo considerado o valor final de cada parâmetro (R_a , e R_t) a média das respectivas medidas.

Modelação Estatística - Base Experimental

Neste capítulo, é descrito e aplicado o modelo estatístico com vista a avaliar a influência dos parâmetros processuais (V_c e a) no processo de corte (*força de avanço* (F_z) e *força específica de corte* (K_s)), no acabamento de superfície (R_a) e no defeito de delaminação à entrada e saída dos furos (*factor de delaminação* (F_d)), na furação de dois tipos de materiais compósitos obtidos por processos distintos (*Autoclave e Moldação Manual*), utilizando brocas helicoidais (“*Straight Shank*” e “*Stub Length*”) e especiais (“*Brad & Spur*”). A análise dos resultados obtidos foi efectuada aplicando a análise de variância (ANOVA - *Analysis of Variance*) e a regressão linear múltipla (MRA- *Multiple Regression Analysis*). Finalmente, foi efectuada a validação experimental dos modelos estatísticos obtidos.

6.1 Modelo Estatístico

O plano de experiências foi elaborado com base na metodologia de Taguchi [Taguchi and Konishi, 1987; Taguchi, 1993]. Esta metodologia tem estado envolvida nos processos industriais desde 1949, contribuindo vastamente para o sucesso no domínio da qualidade dos produtos.

A metodologia de Taguchi recorre a conceitos estatísticos e a matrizes ortogonais para definir os planos experimentais e permite verificar todas as combinações possíveis dos níveis dos vários factores de uma forma organizada. O número de ensaios a realizar é optimizado e igual a uma potência, cuja base é o número de níveis dos factores em estudo e

o expoente é o número de factores. Em comparação com outras metodologias, o recurso às técnicas de Taguchi, além de ser indicada para planos experimentais de variáveis discretas, permite obter informação sobre o comportamento do sistema de forma mais precisa e eficiente [Taguchi and Konishi, 1987; Taguchi, 1993; Alexis, 1995; Figueiredo and Fernandes, 1996; Ross, 1996].

O plano experimental, com base na metodologia de Taguchi, é composto por diversas etapas fundamentais, destacando-se as seguintes [Figueiredo and Fernandes, 1996]:

- (1) - selecção das variáveis (*factores*) do processo e interacções a estudar;
- (2) - selecção do número de níveis para os factores;
- (3) - selecção da matriz ortogonal de Taguchi adequada;
- (4) - atribuição de factores e/ou interacções às colunas da matriz ortogonal;
- (5) - execução dos ensaios;
- (6) - análise de dados.

A utilização desta metodologia para a definição do plano experimental consiste na verificação de todas as combinações possíveis dos níveis dos vários factores de uma forma organizada. Assim, uma matriz ortogonal de Taguchi é constituída por várias combinações de níveis de factores, de modo a que qualquer par de colunas cumpra as condições de ortogonalidade. Deste modo, a ortogonalidade é um aspecto muito importante da matriz, indicando o seu equilíbrio.

6.1.1 Matriz Ortogonal

A definição da matriz ortogonal, com base na metodologia de Taguchi, apresenta a seguinte notação:

$$L_a(b^c) \tag{6.1}$$

sendo, a – número de ensaios a realizar (ou combinações de níveis);

b – número de níveis de cada factor;

c – número de colunas (a atribuir a factores ou interacções).

A Tabela 6.1, apresenta a matriz ortogonal, $L_9(3^4)$, seleccionada para o planeamento experimental, a qual apresenta nove linhas e quatro colunas para os factores e interacções.

Tabela 6.1 – Matriz ortogonal $L_9(3^4)$ [Taguchi, 1993].

$L_9(3^4)$	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Após a selecção da matriz ortogonal, a etapa seguinte passa pela atribuição dos factores e/ou interacções às colunas da matriz. Para tal, recorre-se ao gráfico linear associado a esta matriz ortogonal, $L_9(3^4)$:

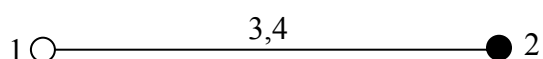


Figura 6.1 – Gráfico linear relativo à matriz $L_9(3^4)$ [Taguchi, 1993].

De acordo com o pretendido, pode ser atribuída à primeira coluna o A e a segunda ao factor B. As colunas 3 e 4 poderão corresponder às interacções entre os factores A e B. Adiciona-se uma coluna para os resultados das experiências e obtêm-se a matriz ortogonal para o plano de experiências pretendido. Na Tabela 6.2, apresenta-se a matriz ortogonal utilizada no planeamento experimental.

Tabela 6.2 – Matriz ortogonal L9 (3^4) utilizada no planeamento experimental

$L_9 (3^4)$	A	B	A × B	A × B ²	Respostas
1	1	1	1	1	y ¹
2	1	2	2	2	y ²
3	1	3	3	3	y ³
4	2	1	2	3	y ⁴
5	2	2	3	1	y ⁵
6	2	3	1	2	y ⁶
7	3	1	3	2	y ⁷
8	3	2	1	3	y ⁸
9	3	3	2	1	y ⁹

6.1.2 Análise de Variância (ANOVA)

Após a execução do plano experimental e recolha dos resultados da resposta a analisar, é necessário tratar os dados obtidos de modo a obter respostas relativas à influência dos factores e interacções. Para tal, recorre-se à análise de variância (*ANOVA*). Esta análise permite determinar a contribuição individual de cada factor e interacções para a dispersão total. A *ANOVA* é extremamente aplicada na Engenharia porque permite determinar a dispersão total de um conjunto de dados, identificando as suas origens e avaliando a contribuição de cada uma das variáveis para a dispersão total. Desta forma, é possível testar a significância dos efeitos relativamente ao erro aleatório (erro de medição, factores não controláveis, etc.) que são designados por ruídos. Os resultados obtidos da análise de variância *ANOVA* de um modo geral são apresentados na forma matricial, conforme se observa na Tabela 6.3.

É importante referir que a determinação da influência dos factores e o seu peso relativo no comportamento do sistema depende dos níveis seleccionados para esses factores. Se os níveis estiverem muito próximos, qualquer factor tenderá a parecer pouco importante, pelo contrário, se estes se encontrarem mais afastados a sua importância tornar-se-á mais evidente.

Tabela 6.3 – Tabela da análise de variância ANOVA

Fonte de variação	Soma de quadrados (SQ)	Graus de liberdade (gl)	Variâncias (DQM)	Teste F	F (5%)	P [%]
A	$SQ_A = \frac{N}{na} \sum a^2$	$n_a - 1$	$DQM_A = \frac{SQ_A}{gl_A}$	$\frac{DQM_A}{DQM_{erro}}$	$F_{A(0.05)}$	P_A
B	$SQ_B = \frac{N}{nb} \sum b^2$	$n_b - 1$	$DQM_B = \frac{SQ_B}{gl_B}$	$\frac{DQM_B}{DQM_{erro}}$	$F_{B(0.05)}$	P_B
A x B	$SQ_{AB} = \frac{N}{n_a n_b} \sum (ab)^2$	$(n_a - 1)(n_b - 1)$	$DQM_{AB} = \frac{SQ_{AB}}{gl_A gl_B}$	$\frac{DQM_{AB}}{DQM_{erro}}$	$F_{AB(0.05)}$	P_{AB}
Erro	$SQ_e = SQ_T - \sum SQ_n$	n_{erro}	$DQM_{erro} = \frac{SQ_{erro}}{gl_{erro}}$	-	-	P_e
Total	$SQ_T = \sum SQ_i$	$\sum gl_n$	-	-	-	$\Sigma (P_n)$

A análise de variância é efectuada, com base na matriz ortogonal, por intermédio da análise das colunas. Deste modo, torna-se necessário descrever as etapas fundamentais para efectuar análise da variância, *ANOVA*, sendo as seguintes:

- (I) - soma dos quadrados;
- (II) - graus de liberdade;
- (III) - variância;
- (IV) - teste F;
- (V) - nível de significância;
- (VI) - percentagem de contribuição.

Apresenta-se previamente, a notação utilizada na demonstração da metodologia de cálculo:

A, B	factores em estudo
A ₁ , A ₂ , A ₃	nível 1, 2 e 3 do factor A
A _i	somatório das observações no nível A _i
\overline{A}_i	média das observações sob o nível A _i (A _i /n _{A_i})
T _o	soma de todas as observações
\overline{T}_o	média de todas as observações ou média global (T/N)
n _{A_i}	número de observações no nível A _i
N	número total de observações
K _A	número de níveis do factor A
y	observação (resultado)
y _i	i-ésima observação

Etapas (I) – Soma dos Quadrados

□ Soma dos quadrados das variações parciais (SQ)

A título de exemplo, a soma dos quadrados da coluna atribuída ao factor A é determinada através de:

$$SQ_A = \sum_{i=1}^{K_A} n_{A_i} (\overline{A}_i - \overline{T}_o)^2 = \left[\sum_{i=1}^{K_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) \right] - \frac{T_o^2}{N} \quad (6.2)$$

□ Soma dos quadrados da variação total (SQ_T)

$$SQ_T = \sum_{i=1}^N (y_i - \overline{T}_o)^2 \quad (6.3)$$

□ Soma dos quadrados da variação decorrente do erro (SQ_{Erro})

Uma vez determinada a soma dos quadrados da variação total e variações parciais, e dado que a variação total (SQ_T) é igual à soma das variações parciais (*factores, interacções e erro*) determina-se a soma de quadrados associada ao erro:

$$SQ_{\text{ERRO}} = SQ_{\text{T}} - SQ_{\text{A}} - SQ_{\text{B}} - SQ_{\text{AB}} \quad (6.4)$$

Etapa (II) – Graus de liberdade (gl)

O número total de graus de liberdade é uma medida da quantidade de informação que se pode obter a partir de uma observação. Representa o número mínimo de comparações a efectuar. Quanto maior o número de níveis associado a um factor, maior é o número de graus de liberdade, ou seja, o seu estudo exige um maior número de comparações, o que torna a informação sobre os seus efeitos mais fiável.

□ Graus de liberdade de um factor

O número de graus de liberdade (*gl*) de um factor é igual ao número de níveis considerado menos um. Isto representa o número de equações independentes que se podem escrever para os efeitos desses factores.

□ Graus de liberdade da interacção de dois factores

O número de graus de liberdade (*gl*) da interacção de dois factores é dado pelo produto dos graus de liberdade de cada factor, ou seja:

$$gl(A \times B) = gl(A) \times gl(B) \quad (6.5)$$

Etapa (III) – Variância

A variância consiste nos desvios quadráticos médios (*DQM*), relação entre a soma de quadrados (*SQ*) e os graus de liberdade (*gl*) respectivos:

$$DQM_A = \frac{SQ_A}{gl_A} \quad (6.6)$$

Etapa (IV) – Teste F

O teste F consiste simplesmente na razão entre variâncias. Estatisticamente é uma ferramenta que permite verificar, para um determinado nível de significância, se os factores e/ou interacções são significativamente diferentes de zero:

$$F = \frac{DQM_A}{DQM_{ERRO}} ; F = \frac{DQM_{AB}}{DQM_{ERRO}} \quad (6.7)$$

Após calculado o valor F, verifica-se através da consulta da Tabela 6.4 a sua significância estatística, ou seja, caso o valor de:

$$F_{\text{calculado}} >> F_{\alpha} (\text{tabela})$$

Então, o factor e/ou interacção é estatisticamente significativo.

Etapa (V) - Nível de significância (α)

O nível de significância representa a probabilidade (ou risco) de se aceitar que o factor ou interacção possa ser significativo quando esta hipótese é nula. Neste trabalho utiliza-se o nível 0.05 como o ponto, a partir do qual, é rejeitada a hipótese nula. Por outras palavras, qualquer conclusão apresentará um nível de confiança de 95%.

Etapa (VI) - Percentagem de contribuição (P)

A percentagem de contribuição é um indicativo do poder relativo de um factor e/ou interacção para reduzir a variação total observada na experiência. Se o nível do factor e/ou interacção for controlado com elevada precisão, a variação total poderá ser reduzida num valor igual ao indicado pela percentagem da contribuição.

Tabela 6.4 – Tabela do Teste F para um nível de confiança de 95% [Guimaraes and Cabral, 1997]

$m \setminus n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	40	120	∞
1	161	199	216	225	230	234	237	239	241	242	248	251	253	254
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.45	19.47	19.49	19.50
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.66	8.59	8.55	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.80	5.72	5.66	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.56	4.46	4.40	4.37
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	3.87	3.77	3.70	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.44	3.34	3.27	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.15	3.04	2.97	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	2.94	2.83	2.75	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.77	2.66	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.65	2.53	2.45	2.41
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.54	2.43	2.34	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.46	2.34	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.39	2.27	2.18	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.33	2.20	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.28	2.15	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.23	2.10	2.01	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.19	2.06	1.97	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.16	2.03	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.12	1.99	1.90	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.10	1.96	1.87	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.07	1.94	1.84	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.05	1.91	1.81	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.03	1.89	1.79	1.73
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.01	1.87	1.77	1.71
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	1.99	1.85	1.75	1.69
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	1.97	1.84	1.73	1.67
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	1.96	1.82	1.71	1.65
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	1.94	1.81	1.70	1.64
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	1.93	1.79	1.68	1.62
31	4.16	3.30	2.91	2.68	2.52	2.41	2.32	2.25	2.20	2.15	1.92	1.78	1.67	1.61
32	4.15	3.29	2.90	2.67	2.51	2.40	2.31	2.24	2.19	2.14	1.91	1.77	1.66	1.60
33	4.14	3.28	2.89	2.66	2.50	2.39	2.30	2.23	2.18	2.13	1.90	1.76	1.64	1.58
34	4.13	3.28	2.88	2.65	2.49	2.38	2.29	2.23	2.17	2.12	1.89	1.75	1.63	1.57
35	4.12	3.27	2.87	2.64	2.49	2.37	2.29	2.22	2.16	2.11	1.88	1.74	1.62	1.56
36	4.11	3.26	2.87	2.63	2.48	2.36	2.28	2.21	2.15	2.11	1.87	1.73	1.61	1.55
37	4.11	3.25	2.86	2.63	2.47	2.36	2.27	2.20	2.14	2.10	1.86	1.72	1.60	1.54
38	4.10	3.24	2.85	2.62	2.46	2.35	2.26	2.19	2.14	2.09	1.85	1.71	1.59	1.53
39	4.09	3.24	2.85	2.61	2.46	2.34	2.26	2.19	2.13	2.08	1.85	1.70	1.58	1.52
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	1.84	1.69	1.58	1.51
45	4.06	3.20	2.81	2.58	2.42	2.31	2.22	2.15	2.10	2.05	1.81	1.66	1.54	1.47
50	4.03	3.18	2.79	2.56	2.40	2.29	2.20	2.13	2.07	2.03	1.78	1.63	1.51	1.44
55	4.02	3.16	2.77	2.54	2.38	2.27	2.18	2.11	2.06	2.01	1.76	1.61	1.49	1.41
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.75	1.59	1.47	1.39
70	3.98	3.13	2.74	2.50	2.35	2.23	2.14	2.07	2.02	1.97	1.72	1.57	1.44	1.35
80	3.96	3.11	2.72	2.49	2.33	2.21	2.13	2.06	2.00	1.95	1.70	1.54	1.41	1.33
90	3.95	3.10	2.71	2.47	2.32	2.20	2.11	2.04	1.99	1.94	1.69	1.53	1.39	1.30
100	3.94	3.09	2.70	2.46	2.31	2.19	2.10	2.03	1.97	1.93	1.68	1.52	1.38	1.28
110	3.93	3.08	2.69	2.45	2.30	2.18	2.09	2.02	1.97	1.92	1.67	1.50	1.36	1.27
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.66	1.50	1.35	1.26
∞	3.84	3.00	2.61	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.57	1.40	1.22	1.03

❑ Cálculo da Percentagem de contribuição (P)

A variância de um factor ou interacção inclui um certo valor devido ao erro. A seguinte equação mostra este facto para o factor A:

$$DQM_A = DQM'_A + DQM_{\text{erro}} \quad (6.8)$$

sendo, DQM'_A o valor esperado da variância do factor A. Resolvendo em ordem a DQM'_A obtem-se:

$$DQM'_A = DQM_A - DQM_{\text{erro}} \quad (6.9)$$

$$DQM_A = \frac{SQ_A}{gl_A}, \quad \text{então} \quad DQM'_A = \frac{SQ_A}{gl_A} \quad (6.10)$$

Substituindo na equação (4.5),

$$\frac{SQ'_A}{gl_A} = \frac{SQ_A}{gl_A} - DQM_{\text{erro}} \quad (6.11)$$

Resolvendo em ordem a SQ'_A vem,

$$SQ'_A = SQ_A - (DQM_{\text{erro}}) \cdot gl_A \quad (6.12)$$

sendo, SQ'_A a soma de quadrados esperada do factor A.

A percentagem de contribuição para o factor A (P_A) para a variação total é calculada através da seguinte expressão:

$$P(\%) = \left[\frac{SQ'_A}{SQ_T} \right] \times 100 \quad (6.13)$$

Foi efectuada a descrição da metodologia a aplicar ao factor A, o mesmo raciocínio pode ser aplicado a qualquer outro factor ou interacção.

6.1.3 Regressão Linear Múltipla (MRA)

A regressão linear múltipla é uma das técnicas estatísticas mais potentes e de utilização mais frequente com vista a analisar relações lineares envolvendo duas ou mais variáveis [Guimaraes and Cabral, 1997].

O modelo de regressão linear múltipla descreve uma relação entre um conjunto de variáveis quantitativas independentes e uma variável dependente também quantitativa, Y , através da seguinte expressão:

$$Y_n = \alpha + \beta_1 \times (X_{1n} - \overline{X_1}) + \dots + \beta_j \times (X_{jn} - \overline{X_j}) + E_n \quad (6.14)$$

sendo, n as observações das variáveis X_1, \dots, X_j e Y

$(X_{1n}, \dots, X_{jn}, Y_n)$ a n -ésima observação das variáveis X_1, \dots, X_j e Y

$\overline{X_j}$ a média aritmética das observações da variável X_j

α e β_1, \dots, β_j os parâmetros fixos a estimar da relação linear entre X_1, \dots, X_j e Y

E_n o erro aleatório associado ao valor observado Y_n

Esta técnica estatística considera que os valores observados da variável independente, X_n , não se encontram associados quaisquer erros. Tais valores devem ser encarados como constantes predeterminadas e não como observações de uma variável aleatória. A teoria da regressão assenta no seguinte conjunto de hipóteses sobre tais erros, E_n :

- os valores X_{jn} e $\overline{X_j}$ são encarados como constantes predeterminadas, sem erro;
- os erros E_n são mutuamente independentes, têm valor esperado nulo, variância constante (σ^2) e são normalmente distribuídos.

A relação linear múltipla entre as variáveis pode ser avaliada através do *coeficiente de correlação*, parâmetro estatístico que permite descrever a qualidade da relação linear entre as variáveis [Guimaraes and Cabral, 1997].

O **coeficiente de correlação** múltipla entre Y e X_1, \dots, X_j , pode ser definido de duas formas alternativas equivalentes:

- ❑ coeficiente de correlação entre os valores observados da variável Y e os correspondentes valores estimados: $R_{Y\hat{Y}}$

$$\text{sendo, } \hat{Y} = A + B_1 \times (X_1 - \overline{X_1}) + \dots + B_j \times (X_j - \overline{X_j})$$

- ❑ raiz quadrada do coeficiente de determinação múltipla: $R_{Y\hat{Y}}^2$

Em qualquer um dos casos, o coeficiente de correlação múltipla mede o grau de relacionamento linear de Y com o conjunto das variáveis X_1, \dots, X_j .

O coeficiente de correlação múltipla, normalmente representado por **R** assume apenas valores entre -1 e 1 em que:

- ❑ $R = 1$ indica uma correlação perfeita positiva entre as variáveis.
- ❑ $R = -1$ indica uma correlação negativa perfeita entre as variáveis
- ❑ $R = 0$ indica que as variáveis não dependem linearmente entre si.

6.2 Aplicação do Modelo Estatístico

A furação dos materiais compósitos obtidos por diferentes processos de fabrico (*autoclave e moldação manual*) com recurso a brocas de carbonetos sinterizados K10 sem revestimento, realizou-se de acordo com o planeamento experimental previamente definido.

Após a realização dos ensaios, foi aplicado o modelo estatístico anteriormente referido, baseado em matrizes ortogonais e na análise de variância (ANOVA), de forma a avaliar a percentagem de contribuição dos parâmetros de corte (V_c e a) no processo de corte (*Força de avanço* (F_z) e *força específica de corte* (K_s)), no acabamento de superfície dos furos (R_a) e no defeito de delaminação à entrada e saída dos furos (*factor de delaminação* (F_d)).

O tratamento estatístico dos dados foi efectuado em duas fases. A primeira fase contemplou a análise de variância e os efeitos dos factores. A segunda fase permitiu obter correlações entre a força de avanço (F_z), força específica de corte (K_s), rugosidade média aritmética (R_a) e defeito de delaminação à entrada ($F_{d \text{ entrada}}$) e saída ($F_{d \text{ saída}}$).

Posteriormente foram efectuados ensaios de confirmação de forma a validar as equações obtidas por regressão linear múltipla.

6.2.1 Matriz Ortogonal

Nas Tabelas 6.5 e 6.6 apresentam-se os resultados experimentais obtidos, na forma matricial, para a força de avanço (F_z), força específica de corte (K_s), rugosidade média aritmética (R_a), factor de delaminação à entrada e saída ($F_{d\text{ entrada}}$ e $F_{d\text{ saída}}$), em função dos parâmetros de corte (V_c e a), para os furos obtidos com a broca helicoidal “*Straight Shank*” e especial “*Brad & Spur*” nos dois materiais compósitos.

Tabela 6.5 – Resultados obtidos para o material compósito laminado reforçado a fibras de carbono.

Ensaio	Factores		F _z [N]	K _s [MPa]	F _d entrada	F _d saída
	V _c	a				
	[m/min]	[mm/rot]				
Broca helicoidal " <i>Straight Shank</i> "						
1	30	0.05	19.23	313.60	1.121	1.009
2		0.1	31.49	201.60	1.218	1.013
3		0.2	46.78	120	1.324	1.021
4	40	0.05	19.8	320	1.124	1.015
5		0.1	23.95	204.80	1.247	1.024
6		0.2	50.87	134.40	1.373	1.039
7	50	0.05	19.85	345.60	1.126	1.026
8		0.1	26.03	195.20	1.331	1.032
9		0.2	48.63	120	1.414	1.050
Broca especial " <i>Brad & Spur</i> "						
1	30	0.05	12.13	467.20	1.011	1.013
2		0.1	19.25	265.60	1.017	1.015
3		0.2	35.37	160	1.023	1.017
4	40	0.05	21.12	416	1.012	1.016
5		0.1	22.67	230.40	1.022	1.017
6		0.2	17.7	148.80	1.030	1.019
7	50	0.05	21.39	448	1.019	1.018
8		0.1	27.75	227.20	1.023	1.018
9		0.2	17.51	148.80	1.035	1.021

F_z - Força de avanço; K_s - Força específica de corte; F_d - Factor de delaminação (dano)

Tabela 6.6 – Resultados obtidos para o material compósito reforçado a fibras de vidro, Viapal VUP 9731.

Ensaio	Factores		Fz [N]	Ks [MPa]	Ra [μm]	Fd entrada
	V _c	a				
	[m/min]	[mm/rot]				
Broca helicoidal " <i>Stub Lenght</i> "						
1	55	0.05	22.83	742.34	6.70	1.028
2		0.1	33.24	583.58	7.07	1.037
3		0.2	68.36	442.51	7.37	1.070
4	71	0.05	20.64	691.68	5.61	1.039
5		0.1	39.57	543.58	6.39	1.050
6		0.2	56.67	466.12	7.02	1.073
7	86	0.05	23.50	746.59	4.64	1.057
8		0.1	40.83	510.83	5.63	1.069
9		0.2	69.35	430.86	6.40	1.085
Broca especial " <i>Brad & Spur</i> "						
1	55	0.05	6.27	943.81	5.88	1.024
2		0.1	8.67	415.39	6.12	1.034
3		0.2	20.77	229.80	6.52	1.060
4	71	0.05	7.43	878.50	5.25	1.036
5		0.1	12.25	420.78	5.44	1.047
6		0.2	18.83	195.04	5.8	1.063
7	86	0.05	6.13	980.10	4.42	1.048
8		0.1	9.28	426.56	4.92	1.060
9		0.2	18.87	215.94	5.27	1.080
F _z - Força de avanço; K _s - Força específica de corte; R _a - Rugosidade média aritmética; F _d – Factor de delaminação (dano)						

F_z - Força de avanço; K_s - Força específica de corte; R_a - Rugosidade média aritmética; F_d - Factor de delaminação (dano)

6.2.2 Análise de Variância - ANOVA

Conforme referido na secção 6.1, o planeamento experimental desenvolveu-se de acordo com a metodologia Taguchi, considerando dois factores a três níveis cada um. A matriz ortogonal seleccionada foi a L₉ (3⁴) com 9 linhas (8 graus de liberdade) e quatro colunas, com o objectivo de estudar a influência dos parâmetros processuais (*velocidade de corte*, *avanço*) na furação dos materiais compósitos, ao nível do processo de corte, acabamento de superfície obtido e dano. A primeira, e a segunda coluna foram atribuídas ao factor velocidade de corte (V_c), e ao avanço (a), respectivamente.

Nas Tabelas 6.7 e 6.8 apresentam-se os níveis associados a cada um dos factores em estudo para a furação dos diferentes materiais compósitos, respectivamente. A selecção dos níveis é um processo bastante crítico e determinante no estudo do comportamento de um dado sistema, uma vez que a interpretação dos resultados depende fortemente das condições dos ensaios. Desta forma, os níveis foram seleccionados de modo a associar a cada factor um aumento linear e devidamente espaçado do nível anterior.

Tabela 6.7 – Atribuição dos níveis a cada um dos factores para o material compósito reforçado a fibras de carbono.

Nível	Factores	
	Vc [m/min]	a [mm/rot]
1	30	0.05
2	40	0.1
3	50	0.2

Tabela 6.8 – Atribuição dos níveis a cada um dos factores para o material compósito reforçado a fibras de vidro, Viapal VUP 9731.

Nível	Factores	
	Vc [m/min]	a [mm/rot]
1	55	0.05
2	71	0.1
3	86	0.2

O tratamento dos resultados experimentais foi efectuado com base na análise de variância (ANOVA). A análise de variância permite avaliar e determinar a contribuição de cada um dos factores seleccionados na variância total dos resultados.

Nas Tabelas 6.9 à 6.16 apresentam-se os resultados obtidos da análise da variância (ANOVA), para o factor de delaminação à entrada e saída do furo ($F_{d\text{ entrada}}$ e $F_{d\text{ saída}}$), força de avanço (F_z) e força específica de corte (K_s), respectivamente para ambas as ferramentas de corte, broca helicoidal “*Straight Shank*” e especial “*Brad & Spur*” em função do material compósito. A análise foi efectuada com um nível de significância de 5%, isto é,

com um nível de confiança de 95%. A última coluna da tabela representa a percentagem de contribuição (P) de cada um dos factores na variação total dos resultados, indicando o grau de influência no resultado final.

De acordo com os resultados obtidos da Tabela 6.9 verifica-se que o factor avanço ($P = 87.55$ e 67.04%) apresenta grande influência no factor de delaminação à entrada, para as brocas “*Straight Shank*” e “*Brad & Spur*”, respectivamente. O factor velocidade de corte ($P = 25.23\%$) apenas apresenta influência no factor de delaminação à entrada para a broca “*Brad & Spur*”. O erro associado da tabela ANOVA para o factor de delaminação à entrada foi de 7.11 e 7.73% , respectivamente.

Tabela 6.9 – Resultados obtidos da análise ANOVA para o factor de delaminação à entrada ($F_{d\text{ entrada}}$) relativo à operação de furação no material compósito laminado reforçado a fibras de carbono.

Broca helicoidal "<i>Straight Shank</i>"						
Fonte de Variação	SQ	gl	DQM	Teste F	F 5%	P[%]
Velocidade de corte (V_c)	7.15E-03	2	3.66	4.01	6.94	5.34
Avanço (a)	9.18E+01	2	4.59E+01	50.28	6.94	87.55
Erro	3.65	4	9.30E-04	/	/	7.11
Total	1.03E+02	8	/	/	/	100
Broca especial "<i>Brad & Spur</i>"						
Fonte de Variação	SQ	gl	DQM	Teste F	F 5%	P[%]
Velocidade de corte (V_c)	1.30E-04	2	6.50E-05	14.06	6.94	25.23
Avanço (a)	3.30E-04	2	1.65E-04	35.70	6.94	67.04
Erro	1.80E-04	4	5.00E-06	/	/	7.73
Total	4.78E-04	8	/	/	/	100

SQ - Soma dos quadrados; gl - Graus de liberdade; DQM - Variância; P - percentagem de contribuição

A partir dos resultados da Tabela 6.10, verifica-se que o factor velocidade de corte ($P = 48.34$ e 57.09%) seguido do factor avanço ($P = 42.93$ e 37.58%) apresentam grande influência no factor de delaminação à saída, para as brocas “*Straight Shank*” e “*Brad & Spur*”, respectivamente. Ambos os factores apresentam contribuição estatística e física, dado que o valor associado à coluna “Teste F” é superior ao correspondente na coluna F

[5%] e a percentagem de contribuição (P) do factor é superior à percentagem de contribuição do erro. O erro associado da tabela ANOVA para o factor de delaminação à saída foi de 8.73 e 5.53%, respectivamente.

Tabela 6.10 – Resultados obtidos da análise ANOVA para o factor de delaminação à saída ($F_{d\text{ saída}}$) relativa à operação de furação no material compósito laminado reforçado a fibras de carbono.

Broca helicoidal "<i>Straight Shank</i>"						
Fonte de Variação	SQ	gl	DQM	Teste F	F 5%	P[%]
Velocidade de corte (V_c)	7.08E-04	2	3.54E-04	23.17	6.94	48.34
Avanço (a)	6.32E-04	2	3.16E-04	20.68	6.94	42.93
Erro	6.10E-05	4	1.50E-05	/	/	8.73
Total	1.40E+00	8	/	/	/	100
Broca especial "<i>Brad & Spur</i>"						
Fonte de Variação	SQ	gl	DQM	Teste F	F 5%	P[%]
Velocidade de corte (V_c)	2.4E-05	2	1.2E-05	43.85	6.94	57.09
Avanço (a)	1.6E-05	2	8.00E-06	29.20	6.94	37.58
Erro	1.00E-06	4	0	/	/	5.33
Total	4.0E-05	8	/	/	/	100

SQ - Soma dos quadrados; gl - Graus de liberdade; DQM - Variância; P - percentagem de contribuição

De acordo com a Tabela 6.11, verifica-se que o factor avanço ($P = 91.88$ e 87.35%) apresenta grande influência na força de avanço (F_z), seguido do factor velocidade de corte ($P = 5.58$ e 11%) para as brocas "*Straight Shank*" e "*Brad & Spur*", respectivamente. Os factores (V_c e a) apresentam contribuição estatística e física, dado que o valor associado à coluna "Teste F" é superior ao correspondente na coluna F [5%] e a percentagem de contribuição (P) do factor é superior à percentagem de contribuição do erro. O erro associado da tabela ANOVA para a força de avanço foi de 2.54 e 1.66%, para a broca helicoidal "*Straight Shank*" e especial "*Brad & Spur*", respectivamente.

Tabela 6.11 – Resultados obtidos da análise ANOVA para a força de avanço (F_z) relativa à operação de furação no material compósito laminado reforçado a fibras de carbono.

Broca helicoidal "<i>Straight Shank</i>"						
Fonte de Variação	SQ	gl	DQM	Teste F	F 5%	P[%]
Velocidade de corte (V_c)	80.89	2	4.04E+01	9.78	6.94	5.58
Avanço (a)	1.20E+03	2	6.02E+02	145.66	6.94	91.88
Erro	1.65E+01	4	4.14	/	/	2.54
Total	1,30E+03	8	/	/	/	100

Broca especial "<i>Brad & Spur</i>"						
Fonte de Variação	SQ	gl	DQM	Teste F	F 5%	P[%]
Velocidade de corte (V_c)	113.91	2	56.95	27.55	6.94	11.00
Avanço (a)	875.98	2	437.99	211.84	6.94	87.35
Erro	8.27	4	2.07	/	/	1.66
Total	998.16	8	/	/	/	100

SQ - Soma dos quadrados; gl - Graus de liberdade; DQM - Variância; P - percentagem de contribuição

Tabela 6.12 – Resultados obtidos da análise ANOVA para a força específica de corte (K_s) relativa à operação de furação no material compósito laminado reforçado a fibras de carbono.

Broca helicoidal "<i>Straight Shank</i>"						
Fonte de Variação	SQ	gl	DQM	Teste F	F 5%	P[%]
Velocidade de corte (V_c)	1.37E+02	2	6.86E+01	0.44	6.94	0.23
Avanço (a)	6.22E+04	2	3.11E+04	199.95	6.94	97.90
Erro	6.22E+02	4	1.56E+02	/	/	1.88
Total	6.30E+04	8	/	/	/	100

Broca especial "<i>Brad & Spur</i>"						
Fonte de Variação	SQ	gl	DQM	Teste F	F 5%	P[%]
Velocidade de corte (V_c)	1.68E+03	2	8.38E+02	5.13	6.94	0.99
Avanço (a)	1.34E+05	2	6.69E+04	409.47	6.94	98.05
Erro	6.53E+02	4	1.63E+02	/	/	0.96
Total	1.36E+05	8	/	/	/	100

SQ - Soma dos quadrados; gl - Graus de liberdade; DQM - Variância; P - percentagem de contribuição

A partir dos resultados da Tabela 6.12, é possível verificar que o factor avanço ($P = 97.90$ e 98.05%) apresenta grande influência na força específica de corte para as brocas “*Straight Shank*” e “*Brad & Spur*”, respectivamente. O factor avanço apresenta contribuição estatística e física, enquanto o factor velocidade de corte não apresenta qualquer contribuição, dado que $\text{Teste } F < F_{5\%}$ e a percentagem de contribuição (P) < Erro associado. O erro associado da tabela ANOVA para a força específica de corte, as brocas “*Straight Shank*” e “*Brad & Spur*”, foi de 1.88 e 0.96%, respectivamente.

Do mesmo modo, nas Tabelas 6.13 à 6.16 apresentam-se os resultados obtidos da análise da variância (ANOVA), para o factor de delaminação à entrada (F_d), rugosidade média aritmética, força de avanço (F_z) e força específica de corte (K_s), respectivamente para a broca helicoidal “*Stub Length*” e especial “*Brad & Spur*”, relativo ao material compósito Viapal Vup 9731.

Tabela 6.13 – Resultados obtidos da análise ANOVA para o factor de delaminação à entrada ($F_{d \text{ entrada}}$) relativa à operação de furação no material compósito reforçado a fibras de vidro Viapal Vup 9731

Broca helicoidal "Stub Length"						
Fonte de Variação	SQ	gl	DQM	Teste F	F 5%	P[%]
Velocidade de corte (V_c)	9.90E-04	2	4.95E-04	23.81	6.94	31.98
Avanço (a)	1.89E-03	2	9.46E-04	45.52	6.94	62.41
Erro	8.31E-05	4	2.08E-05	/	/	5.61
Total	2.96E-03	8	/	/	/	100
Broca especial "Brad & Spur"						
Fonte de Variação	SQ	gl	DQM	Teste F	F 5%	P[%]
Velocidade de corte (V_c)	8.28E-04	2	4.14E-04	53.2	6.94	33.70
Avanço (a)	1.55E-03	2	7.75E-04	99.7	6.94	63.72
Erro	3.11E-05	4	7.78E-06	/	/	2.58
Total	2.41E-03	8	/	/	/	100

SQ - Soma dos quadrados; gl - Graus de liberdade; DQM - Variância; P - percentagem de contribuição

De acordo com a Tabela 6.13 verifica-se que o factor avanço ($P = 62.41$ e 63.72%) seguido do factor velocidade de corte ($P = 31.98$ e 33.70%) apresenta grande influência no factor

de delaminação à entrada, para as brocas “*Stub Length*” e “*Brad & Spur*”, respectivamente. O erro associado da tabela ANOVA para o factor de delaminação à entrada foi de 5.61 e 2.58%, respectivamente.

De acordo com os resultados obtidos na Tabela 6.14, verifica-se que o factor velocidade de corte ($P = 51.98$ e 77.21%) seguido do factor avanço ($P = 37.83$ e 20.68%) apresenta grande influência na rugosidade média aritmética, para as para as brocas “*Stub Length*” e “*Brad & Spur*”, respectivamente. Ambos os factores apresentam contribuição estatística e física, dado que o valor associado à coluna “Teste F” é superior ao correspondente na coluna F [5%] e a percentagem de contribuição (P) do factor é superior à percentagem de contribuição do erro. O erro associado da tabela ANOVA para o rugosidade média aritmética foi de 10.19 e 2.12%, respectivamente.

Tabela 6.14 – Resultados obtidos da análise ANOVA para a rugosidade média aritmética (R_a) relativa à operação de furação no material compósito reforçado a fibras de vidro Viapal Vup 9731

Broca helicoidal "Stub Length"						
Fonte de Variação	SQ	gl	DQM	Teste F	F 5%	P[%]
Velocidade de corte (V_c)	3.33	2	1.67	21.39	6.94	51.98
Avanço (a)	2.47	2	1.23	15.84	6.94	37.83
Erro	0.31	4	7.79E-02	/	/	10.19
Total	6.11	8	/	/	/	100
Broca especial "Brad & Spur"						
Fonte de Variação	SQ	gl	DQM	Teste F	F 5%	P[%]
Velocidade de corte (V_c)	2.55	2	1.27	146.79	6.94	77.21
Avanço (a)	0.70	2	3.48E-01	40.04	6.94	20.68
Erro	3.47E-02	4	8.68E-03	/	/	2.12
Total	3.28	8	/	/	/	100

SQ - Soma dos quadrados; gl - Graus de liberdade; DQM - Variância; P - percentagem de contribuição

De acordo com a Tabela 6.15, verifica-se que o factor avanço ($P = 93.74$ e 94.71%) apresenta grande influência na força de avanço (F_z), para as brocas “*Stub Length*” e “*Brad & Spur*”, respectivamente. O factor avanço apresenta contribuição estatística e física, dado

que o valor associado à coluna “Teste F” é superior ao correspondente na coluna F [5%] e a percentagem de contribuição (P) do factor é superior à percentagem de contribuição do erro. É de referir que o factor velocidade de corte não apresenta qualquer influência estatística ou física na força de avanço. O erro associado da tabela ANOVA para a força de avanço foi de 6.18 e 5.20%, para a broca helicoidal “*Stub Length*” e “*Brad & Spur*”, respectivamente.

Tabela 6.15 – Resultados obtidos da análise ANOVA para a força de avanço (F_z) relativa à operação de furação no material compósito reforçado a fibras de vidro Viapal Vup 9731

Broca helicoidal "Stub Length"						
Fonte de Variação	SQ	gl	DQM	Teste F	F 5%	P[%]
Velocidade de corte (V_c)	4.72E+01	2	2.36E+01	1.05	6.94	0.08
Avanço (a)	2.77E+03	2	1.39E+03	61.67	6.94	93.74
Erro	8.98E+01	4	2.25E+01	/	/	6.18
Total	2.91E+03	8	/	/	/	100
Broca especial "Brad & Spur"						
Fonte de Variação	SQ	gl	DQM	Teste F	F 5%	P[%]
Velocidade de corte (V_c)	3.09	2	1.54	0.80	6.94	0.28
Avanço (a)	2.67E+02	2	1.33E+02	69.02	6.94	94.51
Erro	7.73	4	1.93	/	/	5.20
Total	2.77E+02	8	/	/	/	100

SQ - Soma dos quadrados; gl - Graus de liberdade; DQM - Variância; P - percentagem de contribuição

Por último, a análise da Tabela 6.16, permite verificar que o factor avanço ($P = 93.24$ e 99.10%) apresenta grande influência na força específica de corte para as brocas “*Stub Length*” e “*Brad & Spur*”, respectivamente. O factor avanço apresenta contribuição estatística e física, enquanto o factor velocidade de corte não apresenta qualquer contribuição, dado que $\text{Teste F} < F\ 5\%$ e a percentagem de contribuição (P) < Erro associado. O erro associado da tabela ANOVA para a força específica de corte, as brocas “*Stub Length*” e “*Brad & Spur*”, foi de 5.23 e 0.73%, respectivamente.

Tabela 6.16 – Resultados obtidos da análise ANOVA para a força específica de corte (K_s) relativa à operação de furação no material compósito reforçado a fibras de vidro Viapal Vup 9731

Broca helicoidal "<i>Stub Length</i>"						
Fonte de Variação	SQ	gl	DQM	Teste F	F 5%	P[%]
Velocidade de corte (V_c)	1.23E+03	2	6.16E+02	1.63	6.94	1.60
Avanço (a)	1.21E+05	2	6.06E+04	61.62	6.94	93.24
Erro	3.93E+03	4	9.84E+02	/	/	5.23
Total	1.26E+05	8	/	/	/	100
Broca especial "<i>Brad & Spur</i>"						
Fonte de Variação	SQ	gl	DQM	Teste F	F 5%	P[%]
Velocidade de corte (V_c)	2.95E+03	2	1.47E+03	1.95	6.94	0.17
Avanço (a)	8.26E+05	2	4.13E+05	545.55	6.94	99.10
Erro	3.03E+03	4	7.57E+02	/	/	0.73
Total	8.32E+05	8	/	/	/	100

SQ - Soma dos quadrados ; gl - Graus de liberdade; DQM - Variância; P - percentagem de contribuição

6.2.3 Regressão Linear Múltipla

De seguida apresentam-se as equações obtidas por regressão linear múltipla (*MRA*), para a força de avanço (F_z), força específica de corte (K_s), rugosidade média aritmética (R_a), e factor de delaminação à entrada e/ou saída (F_d), em função dos parâmetros processuais (V_c e a) para os diferentes materiais compósitos e ferramentas de corte. As equações (4.14 a 4.29) foram obtidas para uma amostra de 18 ($n = 18$ ensaios).

6.2.3.1. Material Compósito Reforçado a Fibras de Carbono

Broca helicoidal "*Straight Shank*"

$$F_{d \text{ entrada}} = 0.932 + 3.46E^{-3} \times V_c + 1.559 \times a \quad R = 0.90 \quad (6.15)$$

$$F_{d \text{ saída}} = 0.966 + 1.085E^{-3} \times V_c + 0.134 \times a \quad R = 0.95 \quad (6.16)$$

$$F_z = 10.81 - 0.0498 \times V_c + 197.33 \times a \quad R = 0.97 \quad (6.17)$$

$$K_s = 347.20 + 0.426 \times V_c - 1260.19 \times a \quad R = 0.88 \quad (6.18)$$

Broca especial “*Brad & Spur*”

$$F_{d \text{ entrada}} = 0.992 + 4.33E^{-4} \times V_c + 0.10 \times a \quad R = 0.95 \quad (6.19)$$

$$F_{d \text{ saída}} = 1.006 + 2.00E^{-4} \times V_c + 0.022 \times a \quad R = 0.97 \quad (6.20)$$

$$F_z = -8.511 + 0.481 \times V_c + 131.12 \times a \quad R = 0.99 \quad (6.21)$$

$$K_s = 533.86 - 1.146 \times V_c - 1790.47 \times a \quad R = 0.83 \quad (6.22)$$

6.2.3.2. Material Compósito Reforçado a Fibras de Carbono - Viapal Vup 9731

Broca helicoidal “*Stub Length*”

$$F_{d \text{ entrada}} = 0.972 + 8.14E^{-4} \times V_c + 0.23 \times a \quad R = 0.96 \quad (6.23)$$

$$R_a = 8.76 - 0.048 \times V_c + 8.12 \times a \quad R = 0.92 \quad (6.24)$$

$$F_z = 2.04 + 0.096 \times V_c + 281.13 \times a \quad R = 0.96 \quad (6.25)$$

$$K_s = 837.94 - 0.867 \times V_c - 1744.28 \times a \quad R = 0.85 \quad (6.26)$$

Broca especial “*Brad & Spur*”

$$F_{d \text{ entrada}} = 0.972 + 7.5E^{-4} \times V_c + 0.21 \times a \quad R = 0.98 \quad (6.27)$$

$$R_a = 7.97 - 0.042 \times V_c + 4.41 \times a \quad R = 0.98 \quad (6.28)$$

$$F_z = 2.97 - 0.014 \times V_c + 87.06 \times a \quad R = 0.95 \quad (6.29)$$

$$K_s = 1014.09 + 0.335 \times V_c - 4413.56 \times a \quad R = 0.82 \quad (6.30)$$

sendo, V_c a velocidade de corte em m/min e a o avanço em mm/rot.

6.2.4 Validação do Modelo Estatístico

Após a obtenção das equações por regressão linear múltipla (*MRA*), que correlacionam os parâmetros processuais (V_c e a) com a força de avanço, a força específica de corte, a rugosidade média aritmética, e o factor de delaminação à entrada e/ou saída, para os diferentes materiais compósitos, tornou-se necessário a validação destas.

Na Tabela 6.17, apresentam-se os parâmetros processuais utilizados para a confirmação das equações obtidas por regressão linear múltipla para o material compósito Viapal Vup 9731.

Tabela 6.17 – Parâmetros processuais utilizados nos ensaios de confirmação para o material compósito Viapal Vup 9731.

Ensaio	V_c [m/min]	a [mm/rot]
1c	60	0.08
2c	60	0.15
3c	76	0.08

A título de exemplo, apenas se apresenta a validação das equações para o material compósito Viapal Vup 9731, para ambas as brocas (“*Stub Length*” e “*Brad & Spur*”), embora a validação das equações tenha sido efectuada para todos os materiais compósitos e brocas.

Nas Tabelas 6.18 e 6.19 apresentam-se os resultados experimentais dos ensaios de confirmação e sua comparação com os resultados obtidos pelas equações (6.23) a (6.30) para a força de avanço (F_z), força específica de corte (K_s), rugosidade média aritmética (R_a) e factor de delaminação à entrada (F_d) para a broca helicoidal “*Stub Length*” e especial “*Brad & Spur*”, respectivamente. O erro apresentado entre os resultados obtidos experimentalmente e regressão linear múltipla (*equações*) é calculado através da seguinte expressão:

$$\text{Erro} = \frac{\text{Valor}_{\text{Experimental}} - \text{Valor}_{\text{Equação}}}{\text{Valor}_{\text{Experimental}}} \times 100 \quad (6.31)$$

Tabela 6.18 – Resultados dos ensaios de confirmação e sua comparação com os resultados obtidos pelos modelos para o material compósito Viapal Vup 9731 relativos à broca helicoidal “*Stub Length*”.

Ensaio	Factor de delaminagem (F_d)			Rugosidade média aritmética (R_a)		
	Valor Experimental	Equação 6.23	Erro [%]	Valor Experimental	Equação 6.24	Erro [%]
1c	1.060	1.039	2.01	6.96	6.53	6.18
2c	1.065	1.055	0.95	7.76	7.10	8.53
3c	1.068	1.052	1.52	6.17	5.76	6.62
Ensaio	Força de avanço (F_z)			Força específica de corte (K_s)		
	Valor Experimental	Equação 6.25	Erro [%]	Valor Experimental	Equação 6.26	Erro [%]
1c	33.88	30.29	10.60	689.40	646.38	6.24
2c	52.85	49.97	5.45	573.73	524.28	8.62
3c	34.68	31.83	8.23	664.00	632.51	4.74

Tabela 6.19 – Resultados dos ensaios de confirmação e sua comparação com os resultados obtidos pelos modelos para o material compósito Viapal Vup 9731 relativo à broca especial “*Brad & Spur*”.

Ensaio	Factor de delaminagem (F_d)			Rugosidade média aritmética (R_a)		
	Valor Experimental	Equação 6.27	Erro [%]	Valor Experimental	Equação 6.28	Erro [%]
1c	1.041	1.039	0.63	6.10	5.80	4.87
2c	1.061	1.049	1.13	6.53	6.11	6.41
3c	1.069	1.046	2.12	5.45	5.13	5.86
Ensaio	Força de avanço (F_z)			Força específica de corte (K_s)		
	Valor Experimental	Equação 6.29	Erro [%]	Valor Experimental	Equação 6.30	Erro [%]
1c	10.05	9.05	9.92	739.20	681.11	7.86
2c	16.34	15.15	7.31	413.71	372.16	10.04
3c	9.31	8.83	5.16	746.00	686.47	7.98

De acordo com a análise dos resultados obtidos, é possível verificar que os resultados obtidos pelas equações (6.23) a (6.30) apresentam um valor de erro máximo cerca de 11%.

Verifica-se também que para a broca helicoidal “*Stub Length*”, a força de avanço apresenta o valor de erro máximo (10.60%), enquanto o factor de delaminação apresenta o menor erro (0.95%). Relativamente à broca especial “*Brad & Spur*”, verifica-se que a força específica de corte apresenta o valor de erro máximo (10.04%), e o factor de delaminação o menor erro (0.63%). Finalmente verifica-se, de um modo geral, que as equações obtidas, por regressão linear múltipla, correlacionam a força de avanço, a força específica de corte, a rugosidade média aritmética e o factor de delaminação com os parâmetros processuais (V_c e a) com um grau de correlação bom.

Resultados Obtidos e sua Discussão

A furação dos materiais compósitos de matriz polimérica, com recurso a brocas convencionais “*Straight Shank e Stub Length*” e especiais “*Brad & Spur*” foi efectuada de acordo com o planeamento experimental previamente delineado. A experimentação envolveu um conjunto de ensaios de curta duração com o objectivo de avaliar a furação de materiais compósitos obtidos por diferentes processos, autoclave e moldação manual, ao nível do dano (*defeito de delaminagem*) e acabamento de superfície obtido no furo e do processo de corte (*forças de corte*).

Os resultados obtidos com base num ensaio e sua repetição são apresentados em função do material ensaiado, compósito laminado reforçado a fibras de carbono obtido por autoclave e compósito reforçado a fibras de vidro obtido por moldação manual.

Numa primeira fase, foi realizado o estudo para material compósito laminado reforçado a fibras de carbono obtido pelo processo autoclave, no qual foram utilizadas brocas com diferente geometria, numa perspectiva de avaliar a influência dos parâmetros processuais (V_c e a) e a geometria de corte, no processo de furação.

Numa segunda fase, foi realizado o mesmo estudo para o material compósito reforçado a fibras de vidro obtido por moldação manual.

Numa terceira fase realizou-se um estudo para avaliar a influência da matriz utilizada no fabrico do compósito reforçado a fibras de vidro, *Viapal VUP 9731* e *ATLAC 3285* na furação, considerando o dano e o acabamento de superfície obtido no furo e as forças de corte geradas durante o processo.

7.1 Compósito Laminado Reforçado a Fibras de Carbono

7.1.1 Dano

O dano à entrada e à saída do furo sofrido pelo material compósito, após a operação de furação, foi avaliado com recurso à microscopia óptica e caracterizado através do factor de delaminação (F_d), conforme referido no Capítulo 4.

Vejamos em primeiro lugar, a título de exemplo, o efeito dos parâmetros processuais (V_c e a), nomeadamente o avanço no dano à entrada do furo utilizando a broca helicoidal “*Straight Shank*” (Figura 7.1) para uma velocidade de corte de 40m/min e avanços 0.05 e 0.2mm/rot, respectivamente.

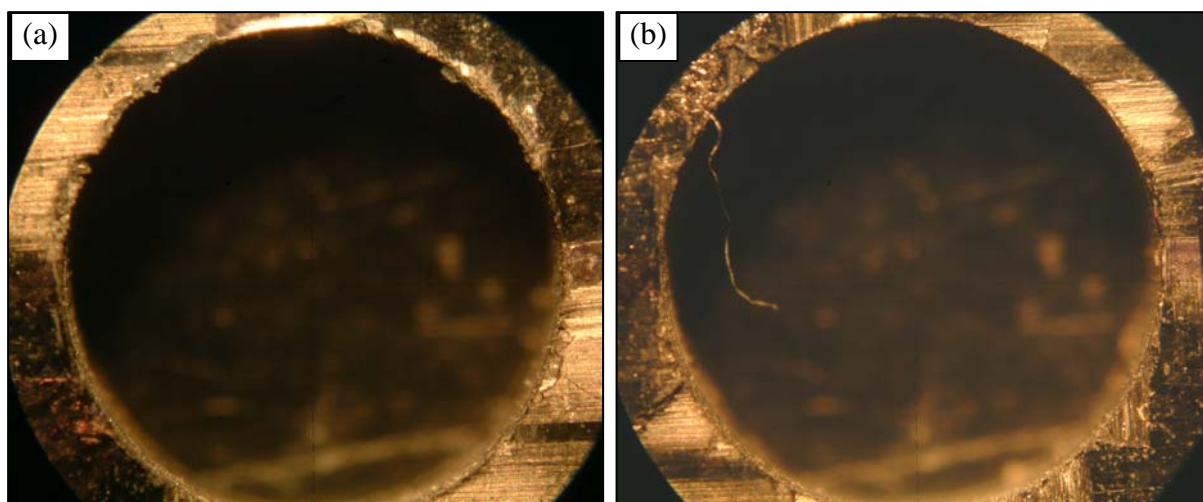


Figura 7.1 – Efeito do avanço no dano à entrada do furo para uma velocidade constante de 40m/min e avanços de (a) 0.05mm/rot e (b) 0.2mm/rot.

Através da Figura 7.1, é possível observar que, para uma velocidade de corte constante de 40m/min, o aumento do avanço de 0.05mm/rot para 0.2mm/rot conduziu a um aumento significativo do defeito de delaminação à entrada do furo. Verificou-se que o parâmetro processual avanço (a), é o parâmetro que maior influência exerce na evolução do dano à entrada do furo.

Em segundo lugar, é ilustrado o efeito da entrada e saída do furo no dano utilizando a broca helicoidal “*Straight Shank*” com uma velocidade de corte de 40m/min e um avanço de 0.2mm/rot.

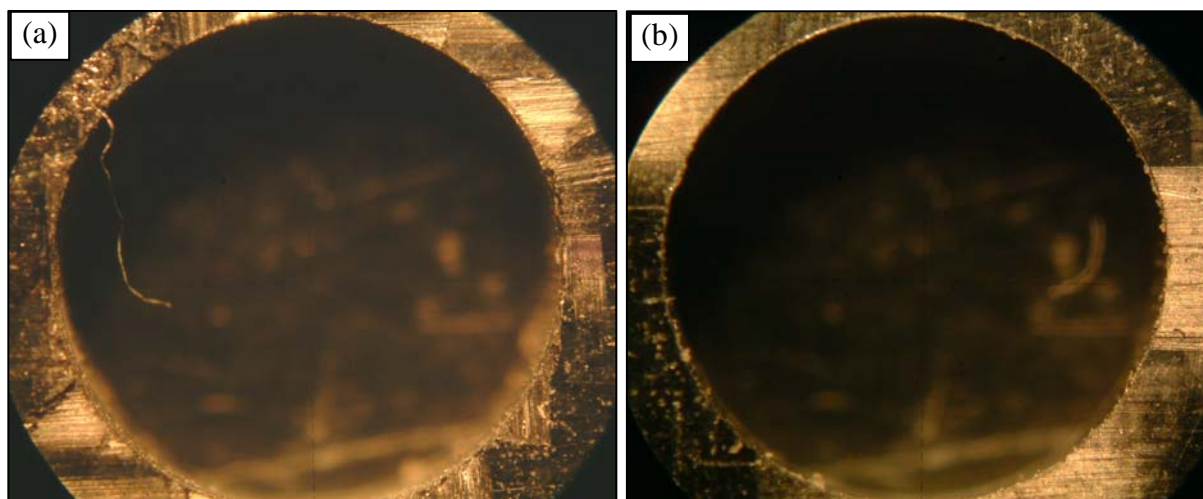


Figura 7.2 – Influência do efeito à (a) entrada e (b) saída do furo no dano para o compósito laminado reforçado a fibras de carbono utilizando uma velocidade de corte de 40m/min e um avanço de 0.2mm/rot.

De acordo com a Figura 7.2, é possível observar que o dano à entrada do furo é superior ao dano na saída para as mesmas condições de corte. Este facto encontra-se relacionado com a compressão inicial exercida pela ferramenta de corte, enquanto na saída do furo as camadas encontram-se sujeitas à tracção seguida do corte, levando a que as camadas fracturem muito próximo do diâmetro nominal do furo evitando a propagação da fractura.

Finalmente ilustra-se o efeito da geometria da broca, helicoidal “*Straight Shank*” e especial “*Brad & Spur*”, no dano à entrada do furo.

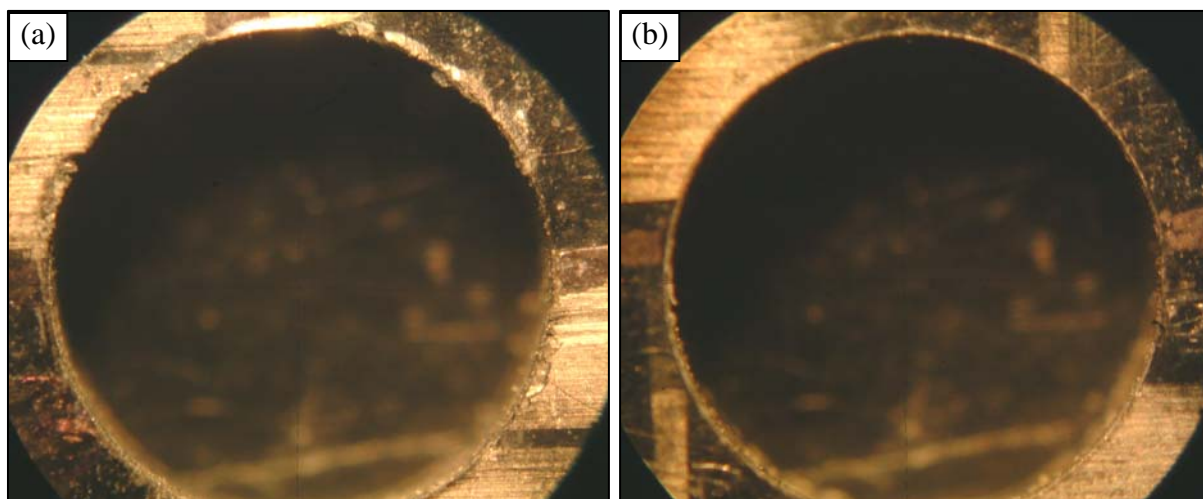


Figura 7.3 – Efeito da geometria de corte da broca (a) helicoidal “*Straight Shank*” e (b) especial “*Brad & Spur*” no dano à entrada do furo para uma velocidade de corte de 40m/min e um avanço de 0.05mm/rot.

De acordo com a Figura 7.3, é possível observar para os mesmos parâmetros de corte, a broca especial “*Brad & Spur*” provoca menor dano à entrada do furo comparado com o obtido pela broca helicoidal “*Straight Shank*”. Deste modo, verifica-se que a obtenção de furos com o menor dano possível passa pela utilização da broca especial “*Brad & Spur*” em detrimento da broca helicoidal, dado que apresenta menor dano para os mesmos parâmetros de corte.

Na Tabela 7.1 apresentam-se os resultados obtidos através da equação (4.2) para o factor de delaminagem (Fd) à entrada e saída do furo, em função dos parâmetros processuais (V_c e a), para ambas as ferramentas de corte, broca helicoidal “*Straight Shank*” e “*Brad & Spur*”.

Tabela 7.1 – Resultados obtidos para o factor de delaminação (F_d) à entrada e saída do furo, em função dos parâmetros processuais, para ambas as ferramentas e corte

Velocidade de corte [m/min]	Avanço [mm/rot]	F_d entrada	F_d saída
Broca helicoidal "<i>Straight Shank</i>"			
30	0.05	1.121	1.009
	0.075	1.153*	1.008*
	0.1	1.218	1.013
	0.15	1.269*	1.019*
	0.2	1.324	1.021
40	0.05	1.124	1.015
	0.075	1.187*	1.019*
	0.1	1.247	1.024
	0.15	1.304*	1.029*
	0.2	1.373	1.039
50	0.05	1.126	1.026
	0.075	1.222*	1.030*
	0.1	1.331	1.032
	0.15	1.338*	1.040*
	0.2	1.414	1.050
Broca especial "<i>Brad & Spur</i>"			
30	0.05	1.011	1.013
	0.075	1.013*	1.014*
	0.1	1.017	1.015
	0.15	1.021*	1.015*
	0.2	1.023	1.017
40	0.05	1.012	1.016
	0.075	1.018*	1.016*
	0.1	1.022	1.017
	0.15	1.025*	1.017*
	0.2	1.030	1.019
50	0.05	1.019	1.018
	0.075	1.023*	1.018*
	0.1	1.023	1.018
	0.15	1.030*	1.019*
	0.2	1.035	1.021

* Valores obtidos por regressão linear múltipla (Eqs. (6.15), (6.16), (6.19) e (6.20))

Nas Figuras 7.4 e 7.5, observa-se a evolução do factor de delaminagem à entrada e saída do furo, respectivamente, em função do avanço para diferentes velocidades de corte, para a broca helicoidal “*Straight Shank*” e especial “*Brad & Spur*”.

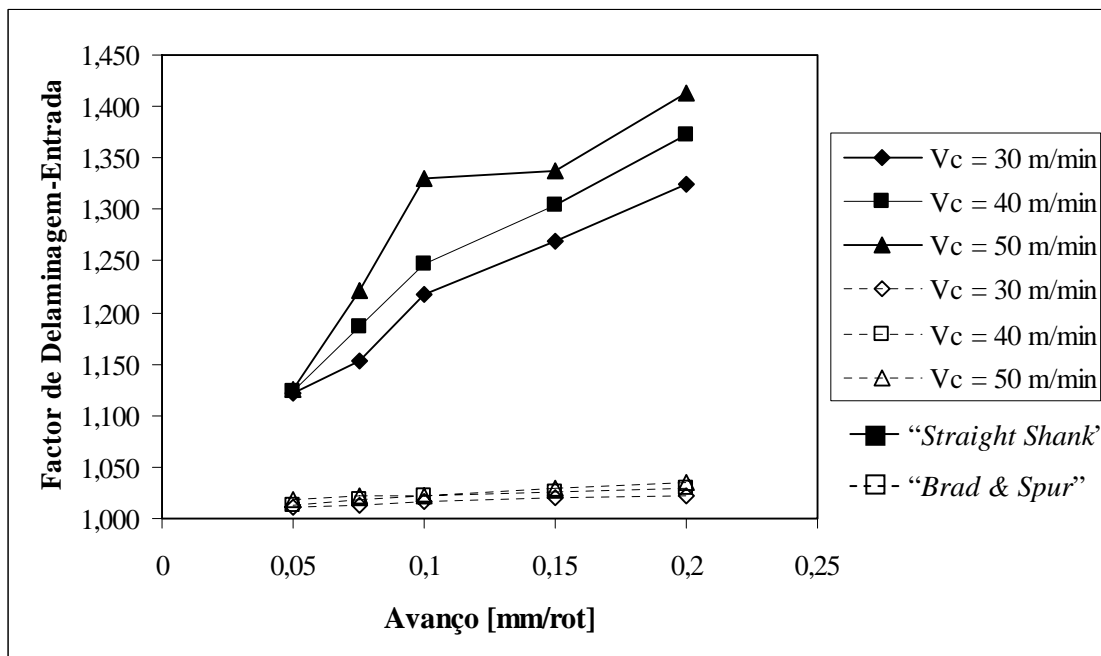


Figura 7.4 – Evolução do factor de delaminagem à entrada do furo em função do avanço para diferentes velocidades de corte

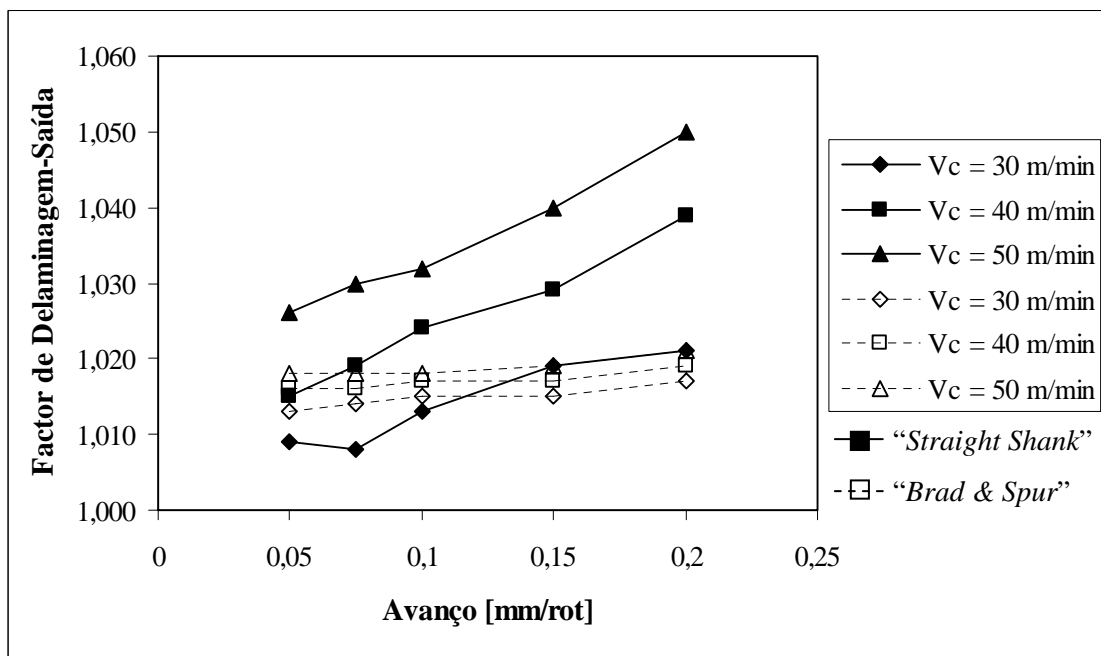


Figura 7.5 – Evolução do factor de delaminagem à saída do furo em função do avanço para diferentes velocidades de corte

De acordo com os resultados obtidos na Figura 7.4, verifica-se, de um modo geral, que o aumento dos parâmetros processuais (V_c e a) conduz a um aumento do factor de delaminação à entrada ($F_{d \text{ entrada}}$). Este aumento é mais notório para a broca helicoidal "*Straight Shank*". Observa-se que o avanço é o parâmetro que mais afecta a evolução do factor de delaminação no processo de corte. Verifica-se também, que para os mesmos parâmetros processuais, a broca especial "*Brad & Spur*" apresenta valores de factor de delaminação à entrada do furo muito inferiores (1.011 a 1.035) aos obtidos pela broca helicoidal "*Straight Shank*" (1.121 a 1.373), estando na origem destes resultados a geometria especial da broca.

Através da Figura 7.5, observa-se mais uma vez que o aumento dos parâmetros processuais conduz a um aumento do factor de delaminação à saída ($F_{d \text{ saída}}$), verificando-se mais uma vez que o avanço continua a exercer mais influência no dano. Observa-se, em geral, que a broca especial "*Brad & Spur*" também apresenta valores de factor de delaminação à saída do furo, inferiores aos obtidos pela broca helicoidal "*Straight Shank*".

Nas Figuras 7.6 e 7.7, observa-se a evolução do factor de delaminação (F_d) à entrada e saída, em função do avanço para diferentes velocidades de corte, para ambas a ferramentas de corte, broca helicoidal "*Straight Shank*" e especial "*Brad & Spur*", respectivamente.

Através da Figura 7.6, observa-se, claramente, que a broca helicoidal "*Straight Shank*" conduz a um factor de delaminação (F_d) à entrada superior relativamente à saída, isto é, o dano à entrada do furo é bastante superior quando comparado com o da saída. Este facto encontra-se relacionado com a geometria e a compressão inicial exercida pela ferramenta de corte, ou seja, durante a operação de furação o material compósito laminado sofre uma compressão seguida do corte, conduzindo a que as primeiras camadas fracturem em zona incerta. Na saída do furo as camadas encontram-se sujeitas à tracção seguida do corte, levando a que as camadas fracturem muito próximo do diâmetro nominal do furo, evitando a propagação da fractura.

A título de conclusão, verifica-se que o dano à entrada é superior ao da saída para ambas as brocas, especialmente para a broca helicoidal "*Straight Shank*".

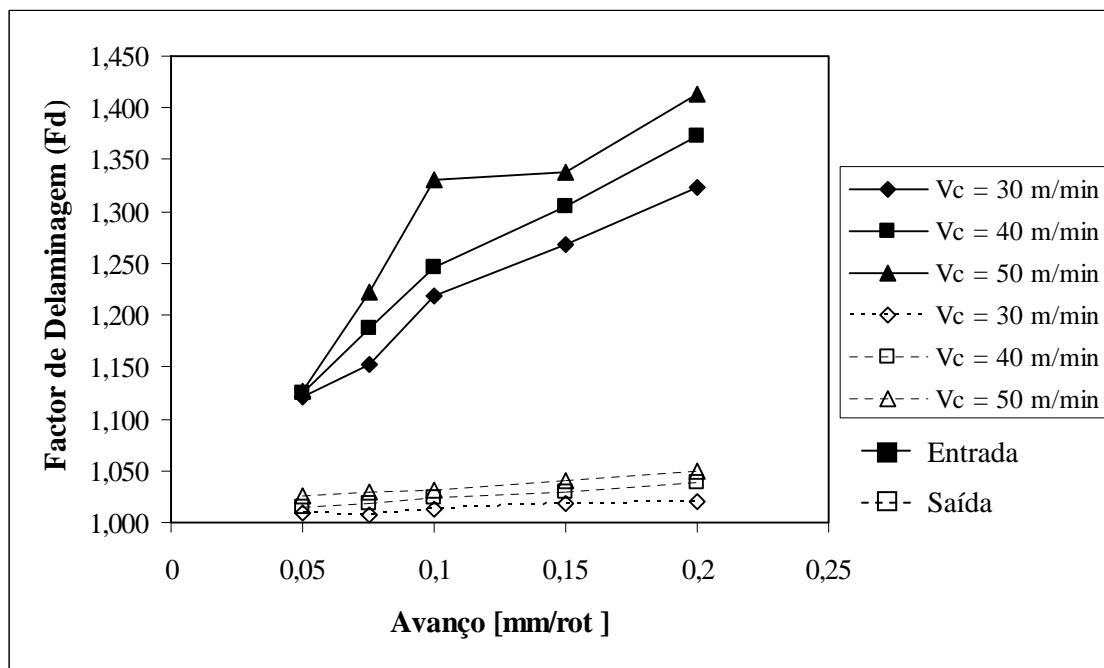


Figura 7.6 – Evolução do factor de delaminação à entrada e saída do furo em função do avanço para a broca helicoidal "Straight Shank"

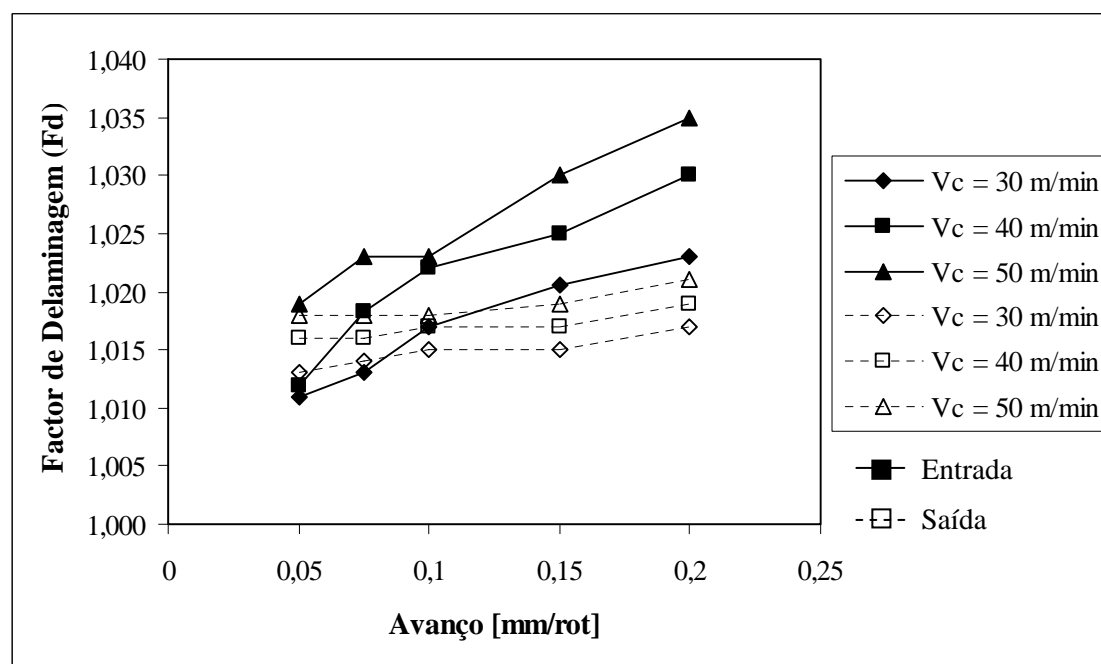


Figura 7.7 – Evolução do factor de delaminação à entrada e saída do furo em função do avanço para a broca especial "Brad & Spur"

De acordo com a Figura 7.7, observa-se que a broca especial "Brad & Spur", de um modo geral, também conduz a um factor de delaminação à entrada superior quando comparado

com o da saída. No entanto, verifica-se que existe uma diferença pouco significativa entre o factor delaminação à entrada e saída, estando associado a este facto a geometria da broca, permitindo que o corte das camadas iniciais seja feito de uma forma mais homogéneo.

Face aos resultados apresentados, verificou-se que o factor de delaminação é fortemente dependente dos parâmetros de corte e da geometria da ferramenta de corte (*broca*). Apesar de existir dano à entrada e saída do furo, verificou-se que o dano à entrada é superior ao da saída. Verificou-se também que a broca especial “*Brad & Spur*” apresenta um melhor desempenho que a broca “*Straight Shank*”, conduzindo a um menor dano tanto à entrada como à saída.

7.1.2 Forças de Corte

A medição e a aquisição da força de avanço (F_z) e do binário (M_z), geradas no processo de furação, foi efectuado através do dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9272, e do seu respectivo sistema de aquisição de dados, conforme referido no Capítulo 5, secção 5.5.1.

Posteriormente foi determinada a força específica de corte (K_s) de forma a avaliar a furação do material compósito relativo ao processo de corte através da expressão (2.10).

Na Tabela 7.2 apresentam-se os resultados obtidos para a força de avanço (F_z) e força específica de corte (K_s) calculados através da expressão (2.10), em função dos parâmetros processuais (V_c e a), para ambas as ferramentas de corte, broca helicoidal “*Straight Shank*” e especial “*Brad & Spur*”.

Tabela 7.2 – Resultados obtidos para a força de avanço (F_z) e força específica de corte (K_s), em função dos parâmetros processuais, para ambas as ferramentas de corte

Velocidade de corte [m/min]	Avanço [mm/rot]	Fz [N]	Ks [MPa]
Broca helicoidal "<i>Straight Shank</i>"			
30	0.05	19.23	313.60
	0.075	25.10*	259.16*
	0.1	31.49	201.60
	0.15	38.92*	170.95*
	0.2	46.78	120.00
40	0.05	19.80	320.00
	0.075	24.60*	263.42*
	0.1	23.95	204.80
	0.15	38.42*	175.21*
	0.2	50.87	134.40
50	0.05	19.85	345.60
	0.075	24.11*	267.68*
	0.1	26.03	195.20
	0.15	37.92*	179.47*
	0.2	48.63	120.00
Broca especial "<i>Brad & Spur</i>"			
30	0.05	12.13	467.20
	0.075	16.41*	356.24*
	0.1	19.25	265.60
	0.15	25.59*	230.91*
	0.2	31.37	160.00
40	0.05	17.70	416.00
	0.075	21.22*	344.78*
	0.1	23.67	230.40
	0.15	30.40*	219.45*
	0.2	38.70	148.80
50	0.05	21.39	448.00
	0.075	26.03*	333.32*
	0.1	29.75	227.20
	0.15	35.21*	207.99*
	0.2	40.51	148.80

* Valores obtidos por regressão linear múltipla (Eqs.(6.17), (6.18), (6.21) e (6.22))

Nas Figuras 7.8 e 7.9, observa-se a evolução da força de avanço (F_z) e força específica de corte (K_s), respectivamente, em função do avanço para diferentes velocidades de corte, para a broca helicoidal “*Straight Shank*” e especial “*Brad & Spur*”.

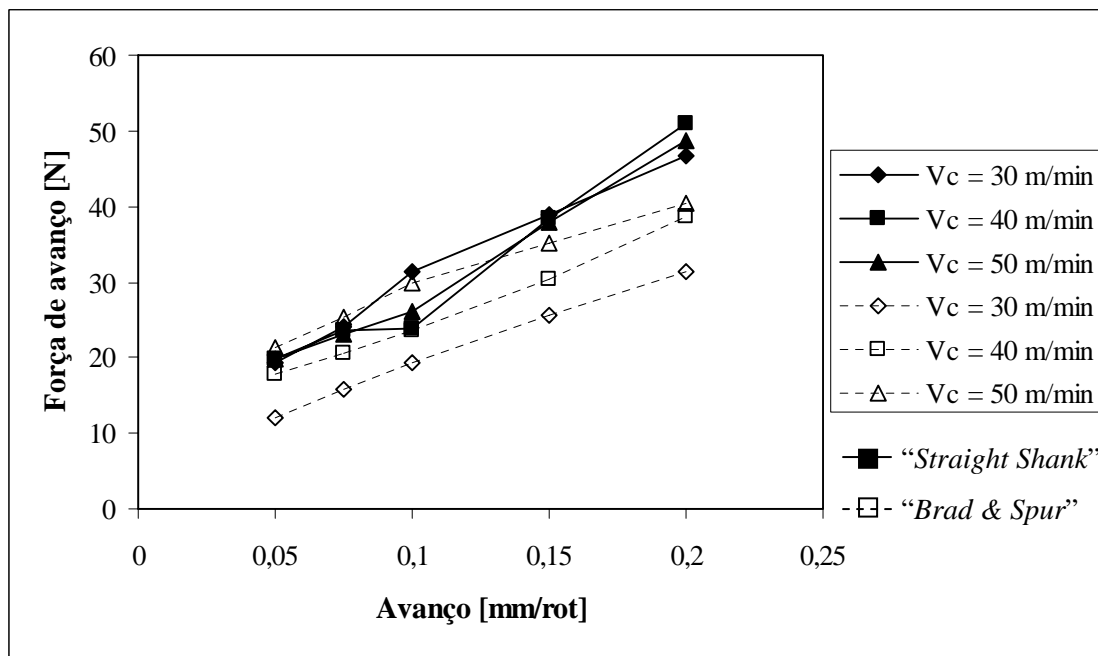


Figura 7.8 – Evolução da força de avanço (F_z) em função do avanço para diferentes velocidades de corte

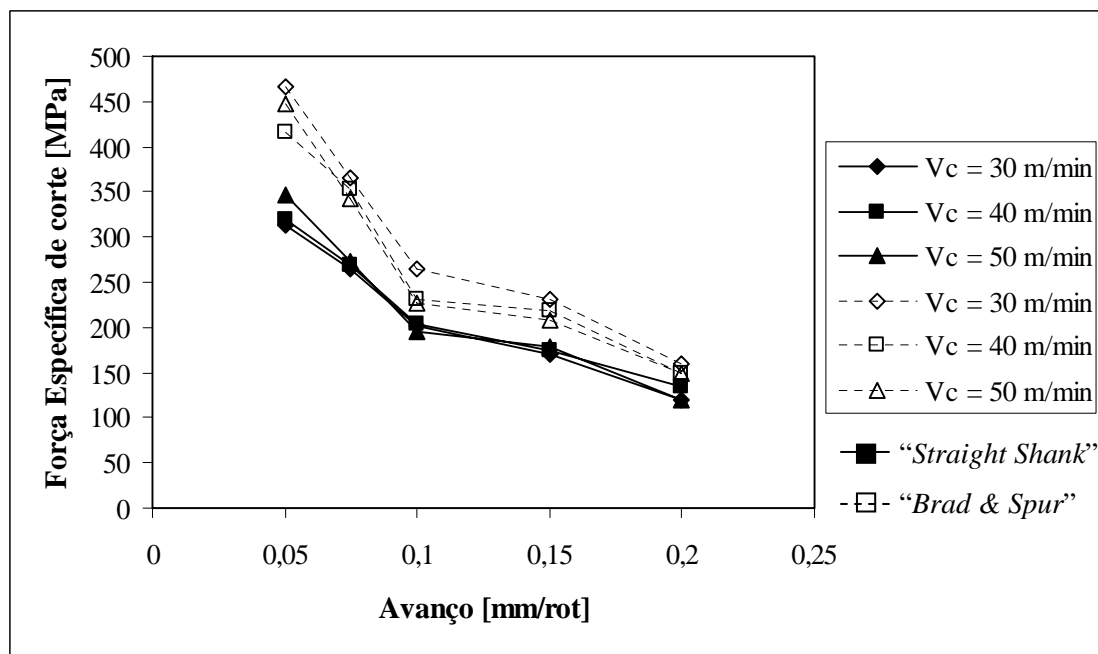


Figura 7.9 – Evolução da força específica de corte (K_s) em função do avanço para diferentes velocidades de corte

De acordo com os resultados obtidos na Figura 7.8, verifica-se, de um modo geral, que o aumento dos parâmetros processuais (V_c e a) conduz a um aumento da força de avanço (F_z), em especial o avanço. O aumento do avanço implica uma maior secção transversal da apara antes do corte, originando um aumento da força de avanço. Em geral, verifica-se que a broca especial “*Brad & Spur*”, apresenta valores inferiores na força de avanço, relativamente à broca “*Straight Shank*”.

Através da Figura 7.9, observa-se que o aumento dos parâmetros processuais conduz a uma diminuição da força específica de corte, em especial com o avanço, atendendo à expressão (2.10). Verifica-se também que a broca “*Brad & Spur*”, apresenta valores de força específica de corte ligeiramente superiores aos obtidos com a broca “*Straight Shank*”, ou seja, a geometria especial da broca especial “*Brad & Spur*” conduz a um maior binário.

Os resultados apresentados anteriormente indicam que a broca especial “*Brad & Spur*” apresenta melhor desempenho ao nível do processo de corte relativamente à broca “*Straight Shank*”, dado que esta apresenta forças de avanço inferiores.

Conforme referido no Capítulo 4, a principal responsável pelo dano (defeito de delaminação) causado no material é a força de avanço. Deste modo, foi efectuado um estudo que relaciona o dano com as forças de corte, de forma a averiguar a informação obtida na literatura.

Nas Figuras 7.10 e 7.11, observa-se a evolução do factor de delaminação à entrada ($F_{d\text{ entrada}}$), em função da força de avanço e força específica de corte, respectivamente para a broca especial “*Brad & Spur*”.

De acordo com a Figura 7.10, verifica-se que o factor de delaminação à entrada ($F_{d\text{ entrada}}$) é extremamente dependente da força de avanço gerada no processo de corte, ou seja, o aumento da força de avanço conduz a um aumento significativo do factor de delaminação. Verifica-se também que existe uma boa correlação ($R^2 = 0.94$) entre o factor de delaminação e a força de avanço.

Através da Figura 7.11, verifica-se que o factor de delaminação diminui com o decréscimo da força específica de corte. Apesar de existir correlação entre o factor de delaminação e a força específica de corte, esta apresenta um valor relativamente baixo ($R^2 = 0.66$). Também podemos verificar que existe uma melhor correlação entre o factor de

delaminação à entrada do furo ($F_{d \text{ entrada}}$) com a força de avanço (F_z), do que com a força específica de corte (K_s), corroborando a informação obtida na literatura.

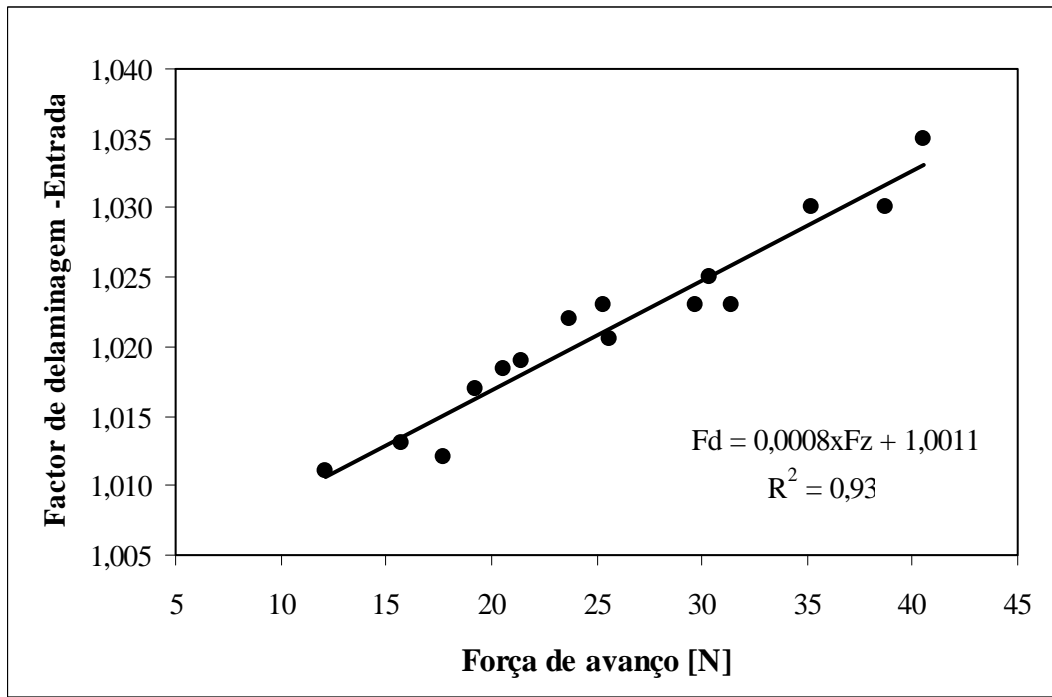


Figura 7.10 – Evolução do factor de delaminação à entrada do furo ($F_{d \text{ entrada}}$) em função da força de avanço

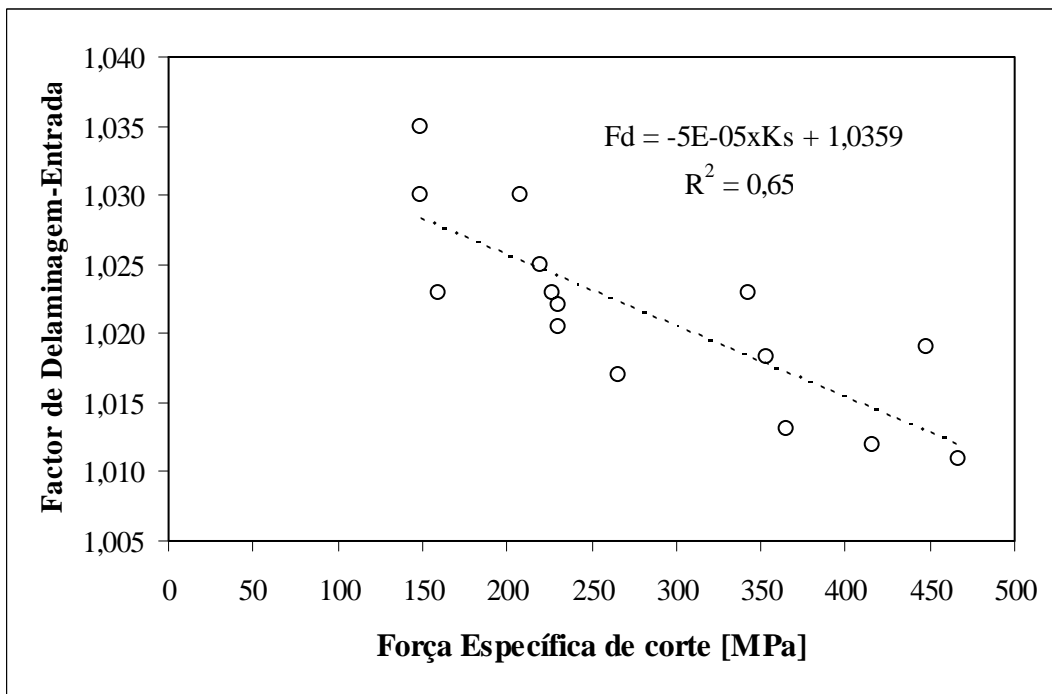


Figura 7.11 – Evolução do factor de delaminação à entrada do furo ($F_{d \text{ entrada}}$) em função da força específica de corte

7.2 Compósito Reforçado a Fibras de Vidro

7.2.1 Dano e Acabamento de Superfície

De igual forma, para o material compósito reforçado a fibras de vidro, o dano foi avaliado com recurso à microscopia óptica e caracterizado através do factor de delaminação (F_d).

A caracterização das superfícies furadas foi efectuada através do rugosímetro de agulha *Hommeltester-T 1000*, utilizando como parâmetro de rugosidade, a rugosidade média aritmética (R_a) de acordo com a norma ISO 4287/1, conforme o indicado no Capítulo 5, secção 5.5.3.

Pretende-se com este estudo avaliar a influência dos parâmetros processuais (V_c e a) e geometria da ferramenta de corte (*helicoidal “Stub Lenght” e especial “Brad & Spur”*), na furação do material compósito reforçado a fibras de vidro, ao nível do dano, acabamento de superfície obtido na peça e do processo de corte (*forças de corte*). Posteriormente, pretende-se relacionar o dano (*factor de delaminação*) com as forças de corte obtidas, nomeadamente a força de avanço (F_z) e força específica de corte (K_s).

Em primeiro lugar ilustra-se o efeito dos parâmetros processuais (V_c e a), nomeadamente o avanço, no dano à entrada do furo. A Figura 7.12 mostra o dano causado pela broca helicoidal “*Stub Lenght*” utilizando uma velocidade de corte de 71m/min e avanços de 0.05mm/rot e 0.2mm/rot, respectivamente.

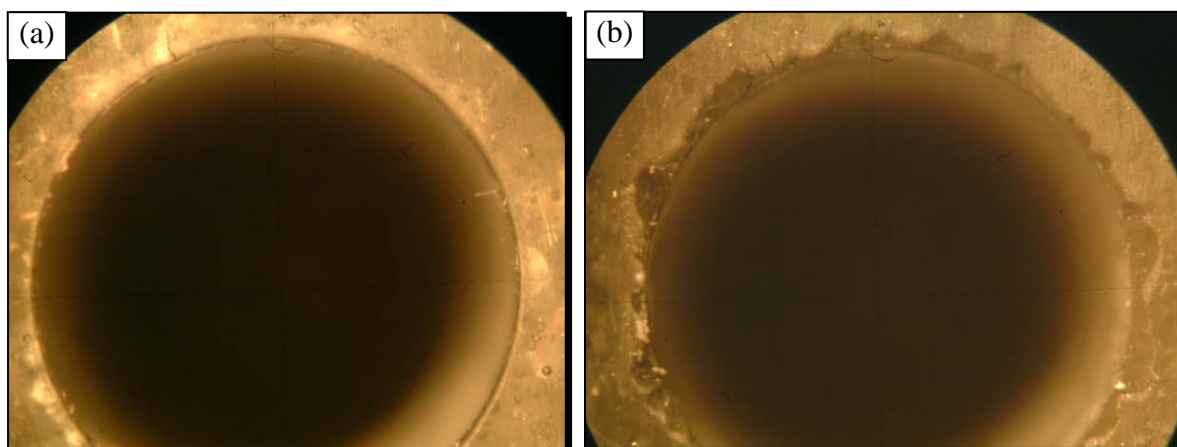


Figura 7.12 – Efeito do avanço no defeito de delaminação à entrada do furo para uma velocidade de corte constante de 71m/min e avanços de (a) $a = 0.05\text{mm/rot}$ e (b) $a = 0.2\text{mm/rot}$ utilizando a broca “*Stub Lenght*”

Através da Figura 7.12, é possível observar que, para uma velocidade de corte constante de 71m/min, o aumento do avanço de 0.05mm/rot para 0.2mm/rot conduziu a um aumento significativo do defeito de delaminagem à entrada do furo. Verificou-se que o parâmetro processual avanço (a), é o parâmetro que maior influência exerce na evolução do dano à entrada do furo.

Em segundo lugar, é ilustrado o efeito da geometria da broca (*helicoidal “Stub Lenght” e especial “Brad & Spur”*) no dano à entrada do furo. A Figura 7.13 mostra o dano causado pela broca helicoidal “*Stub Lenght*” e especial “*Brad & Spur*”, respectivamente, utilizando uma velocidade de 71m/min e um avanço de 0.2mm/rot.

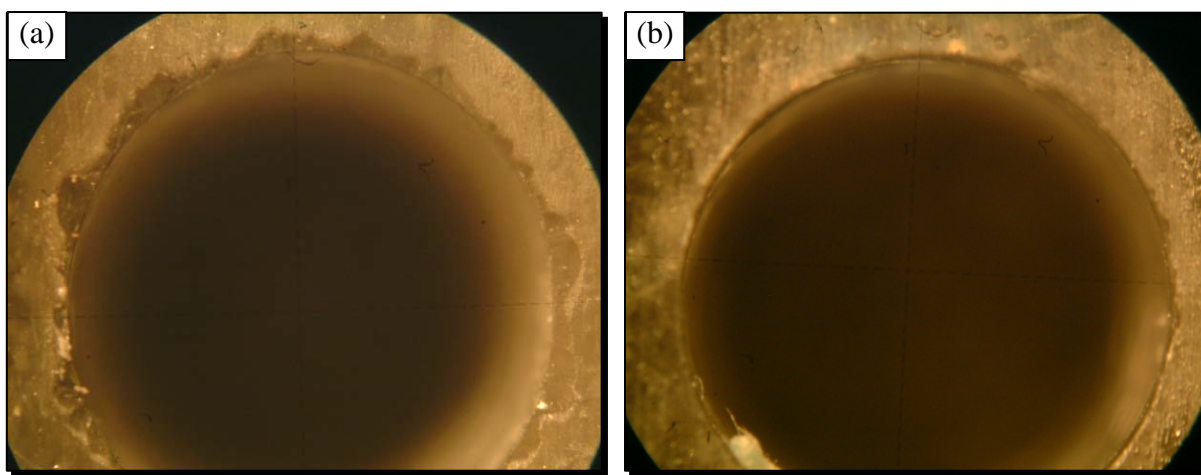


Figura 7.13 – Efeito da geometria da broca no dano à entrada do furo (a) Broca “*Stub Lenght*” (b) Broca “*Brad & Spur*” utilizando uma velocidade de corte de 71m/min e um avanço de 0.2mm/rot

De acordo com a Figura 7.13, é possível observar para os mesmos parâmetros de corte, que a broca especial “*Brad & Spur*” provoca menor dano à entrada do furo comparado com o obtido pela broca helicoidal “*Stub Lenght*”. Deste modo, verifica-se que a obtenção de furos com o menor dano possível passa pela utilização da broca especial “*Brad & Spur*” em detrimento da broca helicoidal, dado que apresenta menor dano para os mesmos parâmetros de corte.

Na Tabela 7.3 apresentam-se os resultados obtidos através da equação (4.2) para o factor de delaminagem (F_d) à entrada do furo e rugosidade média aritmética (R_a), em função dos parâmetros processuais (V_c e a), para ambas as brocas, helicoidal “*Stub Lenght*” e especial “*Brad & Spur*”.

Tabela 7.3 – Resultados obtidos para o factor de delaminação (F_d) à entrada do furo e rugosidade média aritmética (R_a), em função dos parâmetros processuais, para ambas as brocas

Velocidade de corte [m/min]	Avanço [mm/rot]	Fd entrada	Ra [μ m]
Broca helicoidal "<i>Stub Lenght</i>"			
55	0.05	1.028	6.70
	0.075	1.034*	6.73*
	0.1	1.037	7.07
	0.15	1.051*	7.34*
	0.2	1.070	7.37
71	0.05	1.039	5.61
	0.075	1.047*	5.96*
	0.1	1.050	6.39
	0.15	1.064*	6.57*
	0.2	1.073	7.02
86	0.05	1.057	4.64
	0.075	1.059*	5.24*
	0.1	1.069	5.63
	0.15	1.077*	5.85*
	0.2	1.085	6.40
Broca especial "<i>Brad & Spur</i>"			
55	0.05	1.024	5.88
	0.075	1.029*	5.99*
	0.1	1.034	6.12
	0.15	1.045*	6.32*
	0.2	1.060	6.52
71	0.05	1.036	5.25
	0.075	1.041*	5.32*
	0.1	1.047	5.44
	0.15	1.057*	5.65*
	0.2	1.063	5.80
86	0.05	1.048	4.42
	0.075	1.052*	4.69*
	0.1	1.060	4.92
	0.15	1.068*	5.02*
	0.2	1.080	5.27

* Valores obtidos por regressão linear múltipla (Eqs. (6.23), (6.24), (6.27) e (6.28))

Nas Figuras 7.14 e 7.15, observa-se a evolução do factor de delaminação à entrada do furo ($F_{d \text{ entrada}}$) e da rugosidade média aritmética (R_a), respectivamente, em função do avanço para diferentes velocidades de corte, para ambas as ferramentas de corte.

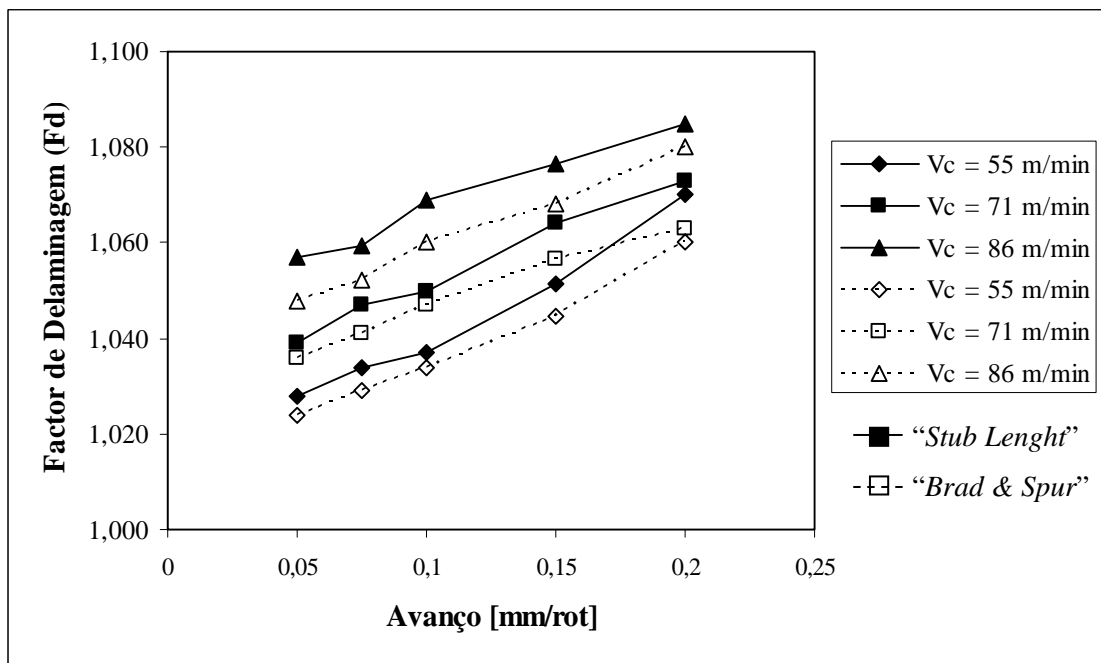


Figura 7.14 – Evolução do factor de delaminação à entrada do furo, em função do avanço, para diferentes velocidades de corte

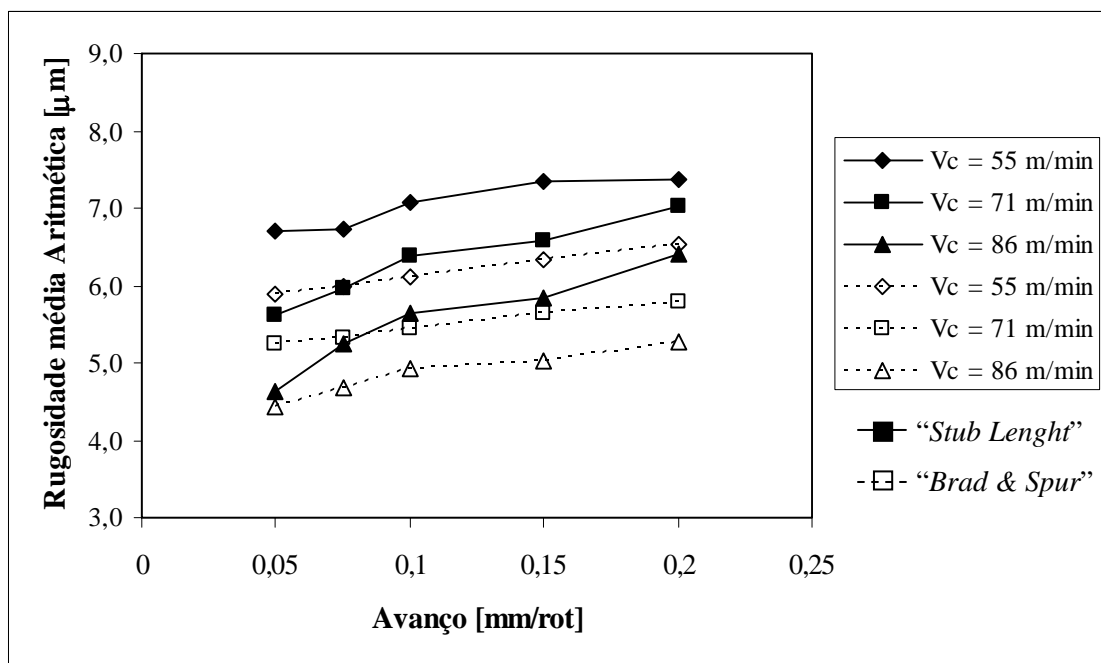


Figura 7.15 – Evolução da rugosidade média aritmética do furo, em função do avanço, para diferentes velocidades de corte

De acordo com os resultados obtidos na Figura 7.14, verifica-se, de um modo geral, que o aumento dos parâmetros processuais (V_c e a) conduz a um aumento do factor de delaminação à entrada ($F_{d \text{ Entrada}}$) do furo para ambas as brocas. Observa-se no entanto, que o avanço é o parâmetro que mais afecta a evolução do factor de delaminação no processo de corte. Verifica-se também que a broca “*Brad & Spur*”, apresenta valores inferiores relativamente à broca helicoidal “*Stub Lenght*”, devido à sua geometria de corte.

Através da Figura 7.15, observa-se que a rugosidade média aritmética (R_a) apresenta uma evolução distinta em função dos parâmetros processuais, ou seja, aumenta com o avanço e diminui com a velocidade de corte. Para obter bom acabamento superficial é necessário utilizar velocidades de corte elevadas e baixos avanços. Observa-se também, que a broca especial “*Brad & Spur*” conduz a valores de rugosidade média aritmética inferiores aos obtidos pela broca helicoidal “*Stub Lenght*”, ou seja, a geometria de corte permite obter melhor acabamento da superfície para as mesmas condições de corte. Contudo, verifica-se que a broca “*Stub Lenght*” apresenta resultados similares aos da broca “*Brad & Spur*” apenas para velocidades elevadas e baixos avanços.

Os resultados apresentados anteriormente, mostram que a broca especial “*Brad & Spur*” apresenta melhor desempenho ao nível do dano e acabamento de superfície em relação à broca helicoidal “*Stub Lenght*”, ou seja, apresenta menor dano e melhor acabamento de superfície do furo devido à geometria da corte.

7.2.2 Forças de Corte

A medição e a aquisição das forças geradas no processo de corte (furação), foi efectuada através do dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9272, e do seu respectivo sistema de aquisição de dados, conforme referido no Capítulo 5, secção 5.5.1.

As Figuras 7.16 e 7.17 ilustram o efeito dos parâmetros processuais (V_c e a) e da geometria de corte (*helicoidal* e *especial*) nas forças de corte (F_z , e M_z), respectivamente, durante a operação de furação do material compósito.

A Figura 7.16 revela o efeito dos parâmetros processuais, nomeadamente o avanço nas forças de corte com a broca helicoidal “*Stub Lenght*”, utilizando uma velocidade de corte de 71m/min e avanços de 0.05mm/rot e 0.2mm/rot, respectivamente.

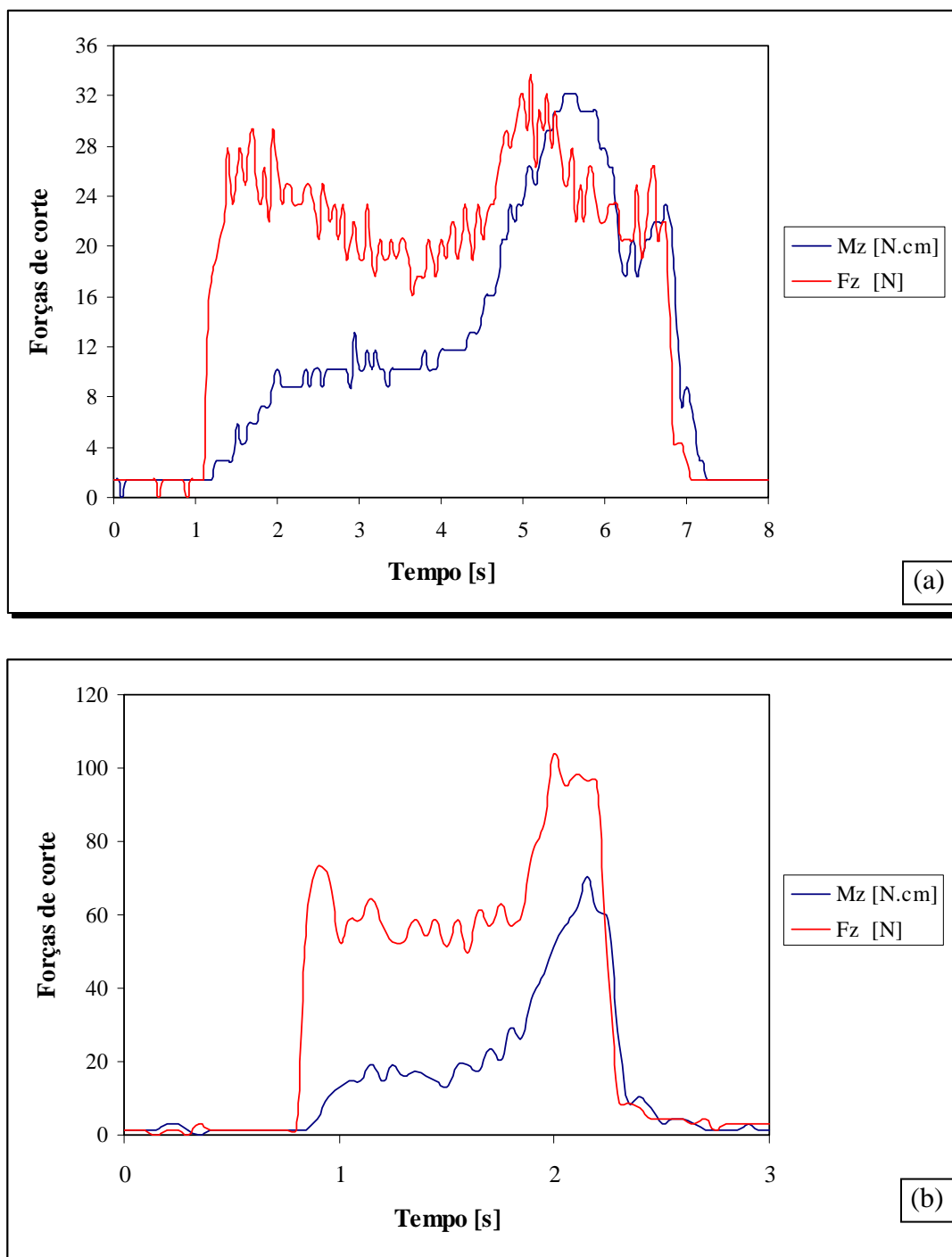


Figura 7.16 – Efeito do avanço nas forças de corte para broca “Stub Length” utilizando uma velocidade de corte constante de 71m/min e avanços de (a) $a = 0.05$ mm/rot e (b) $a = 0.2$ mm/rot

De acordo com os resultados obtidos na Figura 7.16, observa-se, de um modo geral, que o aumento do avanço conduz a um aumento significativo do binário e da força de avanço. Para a mesma velocidade de corte, 71m/min, o aumento do avanço de 0.05 para 0.2mm/rot

originou para o binário um aumento do valor máximo de 32.20 para 70.27 N.cm e da força de avanço de 33.67 N para 103.94 N.

Independentemente do valor de avanço utilizado, verifica-se que o binário começa por apresentar valores baixos no início do furo, que ao longo do tempo vão aumentando, apresentando o valor máximo no final do furo. Contrariamente ao binário, a força de avanço apresenta valores iniciais elevados, sofrendo oscilações no decorrer da operação de furação, atingindo o valor máximo também no final do furo. As forças de corte apresentam este tipo de configuração face à geometria de corte, à formação e escoamento da aparas e à heterogeneidade do material, ou seja, no início do furo, o binário e a força de avanço apresentam valores baixos e elevados, respectivamente, devido à geometria de corte e à resistência do material ao corte. No final do furo ambas as forças de corte apresentam o valor máximo devido à formação e escoamento da aparas, ou seja, esta apresenta-se na forma de pó, contribuindo para o aumento da força de corte e binário dado à dificuldade da sua remoção total durante a operação de furação. A Figura 7.17 ilustra o efeito da geometria de corte, helicoidal “*Stub Length*” e especial “*Brad & Spur*”, nas forças de corte utilizando uma velocidade de corte de 71m/min e um avanço de 0.2mm/rot. Verifica-se que, para as mesmas condições de corte, a broca especial “*Brad & Spur*” apresenta valores bastante inferiores aos obtidos pela broca helicoidal “*Stub Length*”, reduzindo para metade as forças de corte geradas. Este facto está relacionado com a geometria de corte da broca, ou seja, a geometria proporciona condições favoráveis para a formação e escoamento da aparas, conduzindo a uma redução da força de avanço e do binário. Verifica-se também que a broca especial “*Brad & Spur*”, contrariamente ao que sucede com a broca helicoidal “*Stub Length*”, apresenta os valores máximos para o binário e força de avanço no início e a meio do furo, respectivamente. Mais uma vez está relacionado com a geometria, a força de avanço atinge o seu valor máximo no início face à resistência do material ao corte, que ao longo do tempo sofre um decréscimo dado ao escoamento adequado do material (*aparas*). O binário apresenta uma rápida subida seguida de uma descida, dado que a geometria da broca possibilita a realização inicial do furo com uma velocidade de corte máxima, dado que apresenta o diâmetro da broca, contrariamente à broca helicoidal que apresenta uma velocidade de corte zero no início do furo.

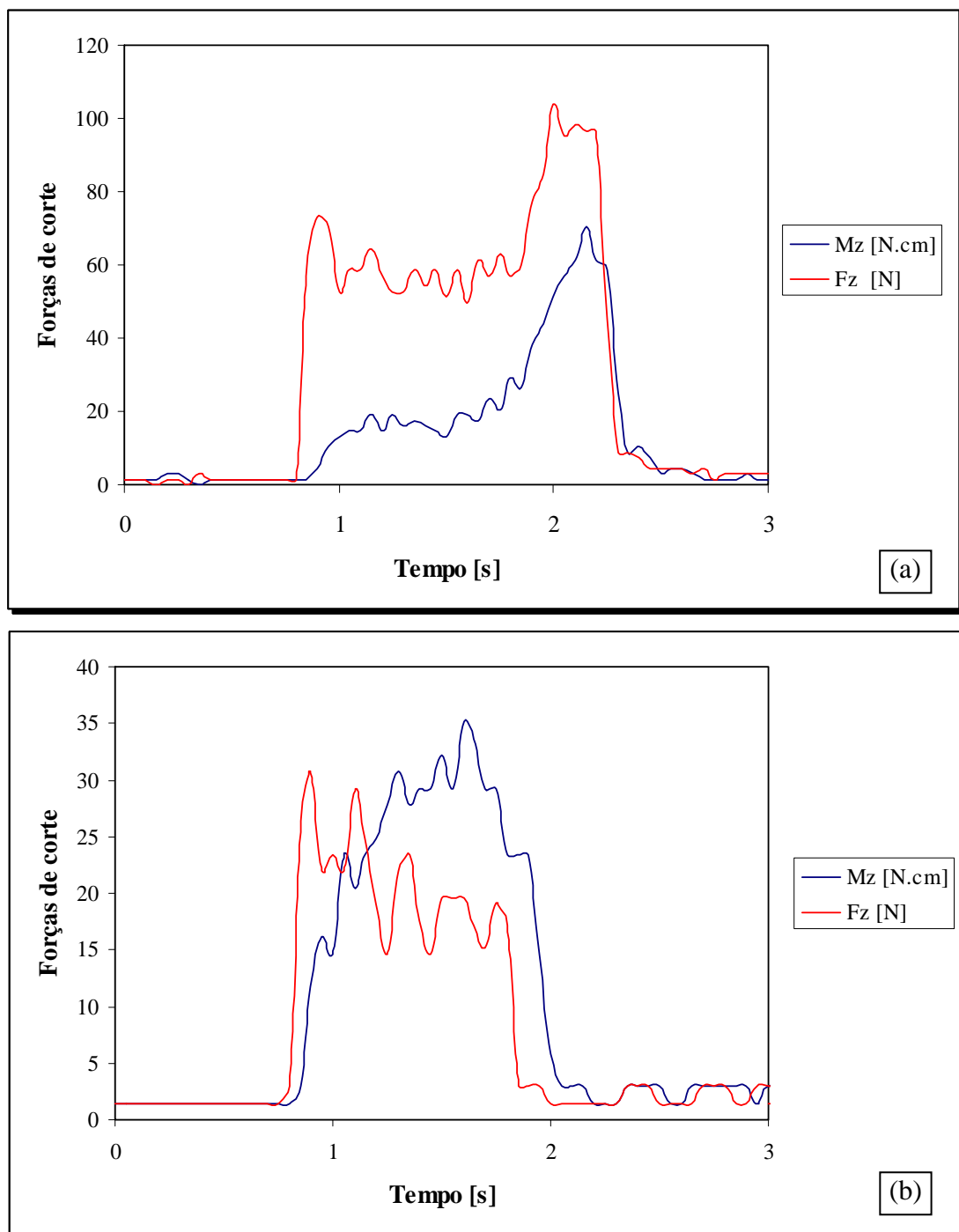


Figura 7.17 – Efeito da geometria de corte (a) broca helicoidal “*Stub Length*” e (b) broca especial “*Brad & Spur*”, nas forças de corte, para as mesmas condições de corte

Na Tabela 7.4 apresentam-se os resultados obtidos para a força de avanço (F_z) e força específica de corte (K_s) calculados através da expressão (2.10), em função dos parâmetros

processuais (V_c e a), para ambas as ferramentas de corte, broca helicoidal “*Stub Lenght*” e especial “*Brad & Spur*”.

Tabela 7.4 – Resultados obtidos para a força de avanço e força específica de corte, em função dos parâmetros processuais, para ambas as ferramentas e corte

Velocidade de corte [m/min]	Avanço [mm/rot]	Fz [N]	Ks [MPa]
Broca helicoidal "Stub Lenght"			
55	0.05	22.83	742.34
	0.075	28.40*	659.43*
	0.1	33.24	583.58
	0.15	49.49*	528.61*
	0.2	68.36	442.51
71	0.05	20.64	691.68
	0.075	29.94*	645.56*
	0.1	39.57	543.58
	0.15	51.03*	514.74*
	0.2	56.67	466.12
86	0.05	23.5	746.59
	0.075	31.38*	632.56*
	0.1	40.83	510.83
	0.15	52.47*	501.74*
	0.2	69.35	430.86
Broca especial "Brad & Spur"			
55	0.05	6.27	943.81
	0.075	8.68*	701.45*
	0.1	8.67	415.39
	0.15	15.21*	370.43*
	0.2	20.77	229.80
71	0.05	7.43	878.50
	0.075	8.46*	706.81*
	0.1	12.25	420.78
	0.15	14.99*	375.79*
	0.2	18.83	195.04
86	0.05	6.13	980.10
	0.075	8.25*	711.83*
	0.1	9.28	426.56
	0.15	14.78*	380.82*
	0.2	18.87	215.94

* Valores obtidos por regressão linear múltipla (Eqs.(6.25), (6.26), (6.29) e (6.30))

A evolução da força de avanço (F_z) e força específica de corte (K_s), em função do avanço para diferentes velocidades de corte é apresentada nas Figuras 7.18 e 7.19, respectivamente, para ambas as ferramentas de corte, broca helicoidal “*Stub Lenght*” e especial “*Brad & Spur*”.

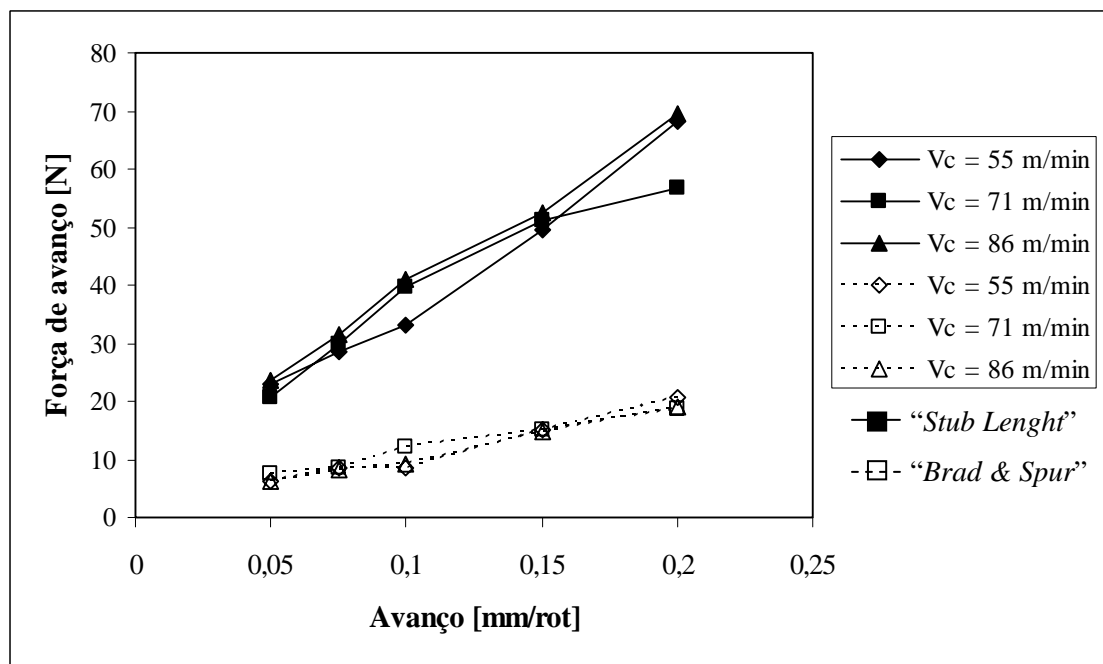


Figura 7.18 – Evolução da força de avanço, em função do avanço, para diferentes velocidades de corte

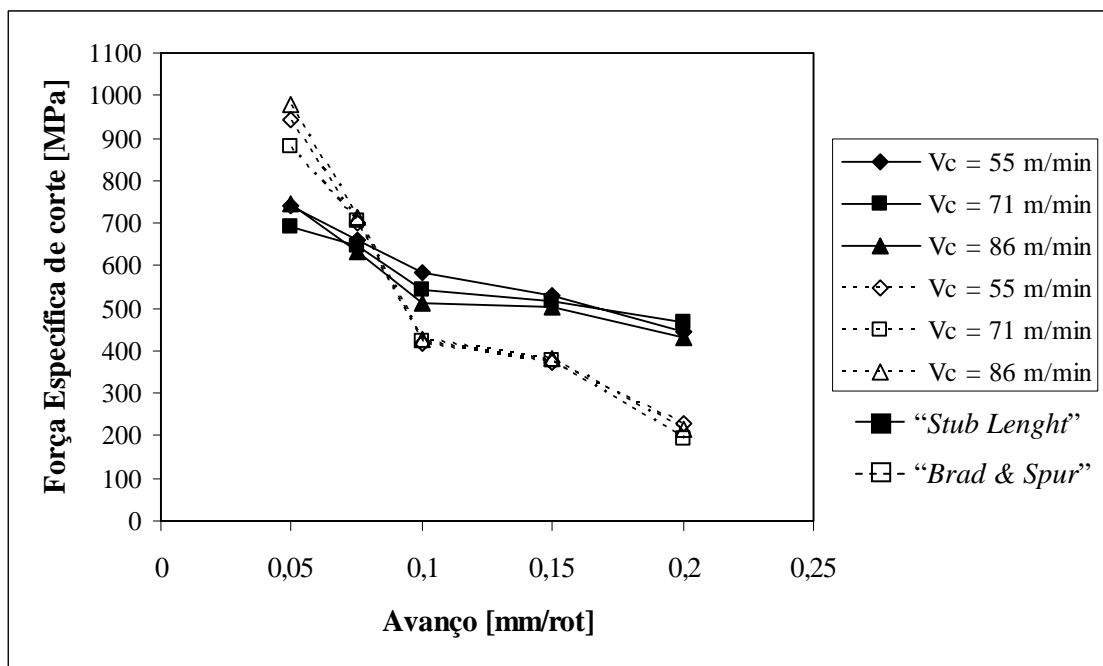


Figura 7.19 – Evolução da força específica de corte, em função do avanço, para diferentes velocidades de corte

De acordo com os resultados obtidos na Figura 7.18, verifica-se, de um modo geral, que o aumento dos parâmetros processuais (V_c e a) conduz a um aumento da força de avanço (F_z), em especial o avanço. O aumento do avanço implica uma maior secção transversal da broca antes do corte, originando um aumento da força de avanço. Em geral, verifica-se que a broca especial “*Brad & Spur*”, apresenta valores bastante inferiores (6.27 a 20.77 N) relativamente à broca “*Stub Length*” (20.64 a 69.35 N) para as mesmas condições de corte. Observa-se que o valor máximo da força de avanço (20.77 N) gerado pela broca especial “*Brad & Spur*” é obtido para avanços elevados, enquanto a broca “*Stub Length*” obtém um valor similar para baixos avanços. A razão pela discrepância de resultados obtidos advém da geometria da broca, ou seja, a geometria proporciona condições favoráveis ao corte conduzindo a uma redução significativa da força de avanço.

Através da Figura 7.19, observa-se que o aumento dos parâmetros processuais conduz a uma diminuição da força específica de corte, em especial com o avanço, atendendo à expressão (2.10). Verifica-se que a broca especial “*Brad & Spur*”, para avanços superiores a 0.075mm/rot, apresenta valores inferiores aos obtidos com a broca “*Stub Length*”, dado que esta parece realizar o furo com menor força de corte, conduzindo a um menor binário, e consequentemente apresenta forças específicas de corte inferiores.

Nas Figuras 7.20 e 7.21, observa-se a evolução do factor de delaminação à entrada ($F_{d\text{ entrada}}$), em função da força de avanço e força específica de corte, respectivamente para a broca “*Brad & Spur*” de forma a verificar se a força de avanço é a principal responsável pelo dano.

De acordo com a Figura 7.20, verifica-se que o factor de delaminação à entrada ($F_{d\text{ entrada}}$) é dependente da força de avanço gerada no processo de corte, ou seja, o aumento da força de avanço implica um aumento significativo no factor de delaminação. Verifica-se no entanto, que a correlação entre o factor de delaminação e a força de avanço é relativamente baixa ($R^2 = 0.65$), podendo este facto estar relacionado com a heterogeneidade do material compósito.

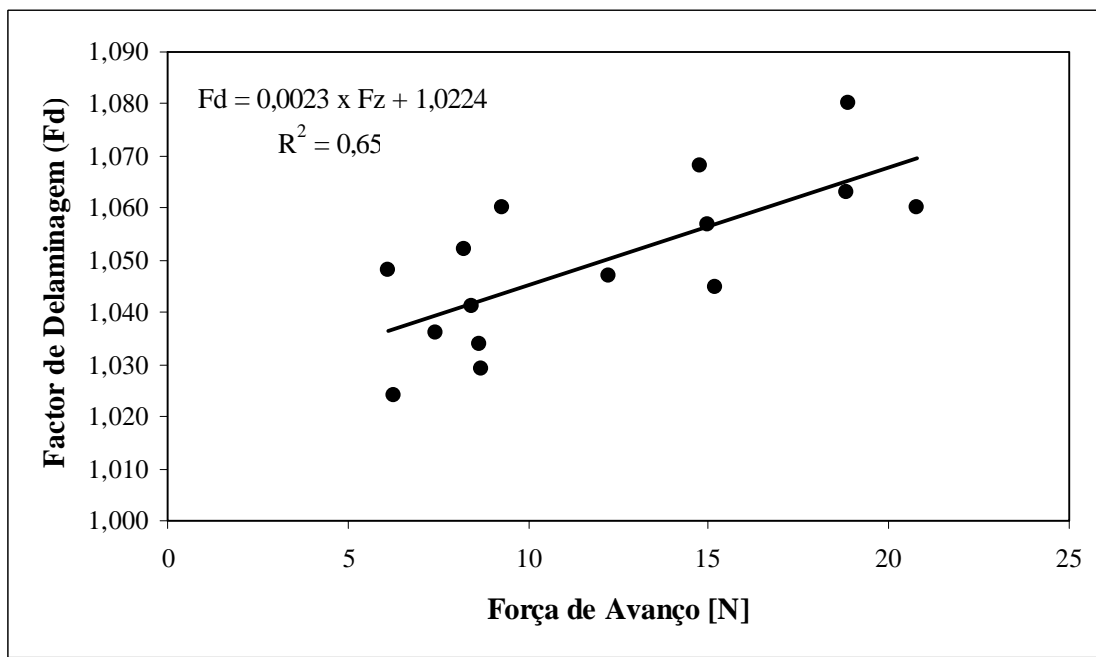


Figura 7.20 – Evolução do factor de delaminação à entrada ($F_{d \text{ entrada}}$) em função da força de avanço

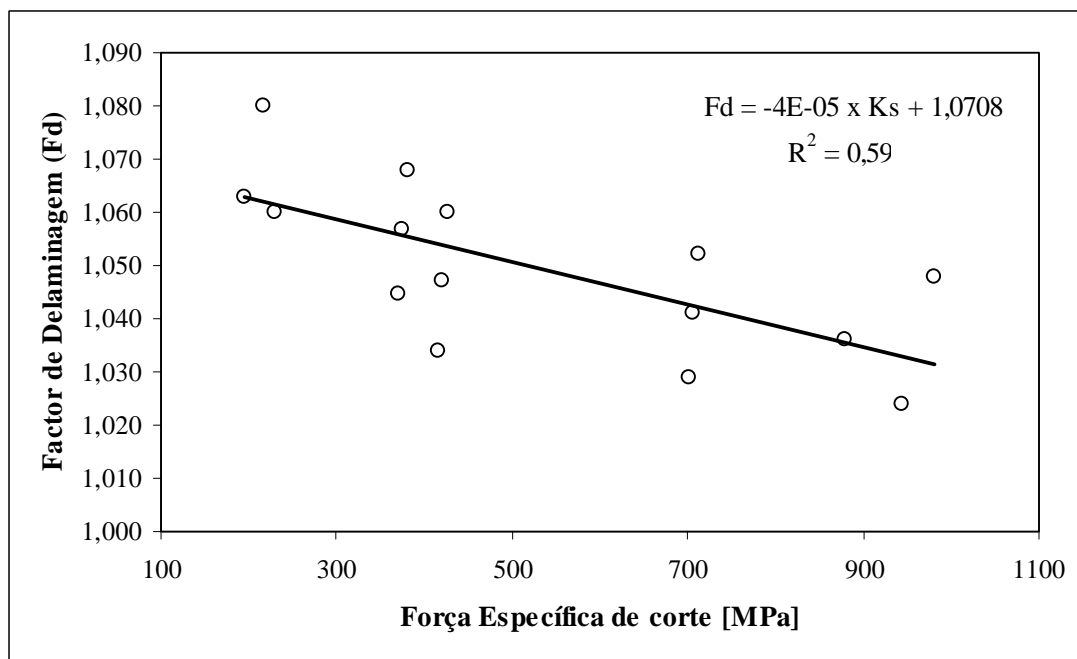


Figura 7.21 – Evolução do factor de delaminação à entrada ($F_{d \text{ entrada}}$) em função da força específica de corte

Através da Figura 7.21, verifica-se que o factor de delaminação diminui com o decréscimo da força específica de corte. Apesar de existir correlação entre o factor de delaminação e a força específica de corte esta apresenta um valor baixo ($R^2 = 0,59$). Também podemos verificar que existe uma melhor correlação entre o factor de

delaminação (F_d) com a força de avanço (F_z) do que com a força específica de corte (K_s), corroborando a informação obtida na literatura [Hocheng and Dharan, 1990; Jain and Yang, 1993, 1994; Lin and Chen, 1996; Chen, 1997; Piquet et al., 2000; Capello and Tagliaferri, 2001; Zhang et al., 2001a].

Tendo em consideração os resultados apresentados anteriormente, verificou-se que a broca “Brad & Spur” apresentou, no âmbito geral, o melhor desempenho ao nível do dano e acabamento de superfície e do processo de corte. De seguida é realizado um estudo comparativo sobre a influência da matriz utilizada no fabrico do material compósito reforçado a fibras de vidro, nomeadamente a resina ortoftálica (Viapal Vup 9731) e bisfenólica (ATLAC 382-05), de forma a avaliar o seu efeito no processo de furação.

7.3 Efeito da Matriz no Compósito Reforçado a Fibras de Vidro

Este estudo consiste em avaliar a influência da matriz utilizada no fabrico do material compósito com 65% de reforço de fibras de vidro, nomeadamente, ortoftálica - Viapal Vup 9731 e bisfenólica - ATLAC 382-05 na furação, ao nível do dano e acabamento de superfície obtido no furo e do processo de corte, dado que segundo o fabricante, Vidropol[®], os compósitos apresentam campos de aplicação distintos.

Tendo em consideração o estudo realizado anteriormente para o compósito com matriz ortoftálica - Viapal Vup 9731, e face aos resultados obtidos, foi seleccionada a broca especial “Brad & Spur” para efectuar o estudo comparativo, visto que apresentou melhor desempenho.

7.3.1 Dano e Acabamento de Superfície

O dano sofrido pelos materiais compósitos de matriz polimérica distinta, nomeadamente ortoftálica - Viapal Vup 9731 e bisfenólica - ATLAC 382-05, foi avaliado com recurso à microscopia óptica e caracterizado através do factor de delaminação (F_d).

A caracterização das superfícies furadas foi efectuada através do rugosímetro de agulha Hommeltester-T 1000, utilizando como parâmetros de rugosidade, a rugosidade média aritmética (R_a) e a amplitude máxima do perfil de rugosidade (R_t) de acordo com a norma ISO 4287/1.

Na Figura 7.12 observa-se o dano causado pela broca especial “*Brad & Spur*”, para os materiais compósitos com diferente matriz, *ortoftálica - Viapal Vup 9731* e *bisfenólica - ATLAC 382-05*, respectivamente, utilizando uma velocidade de corte de 71m/min e um avanço de 0.2mm/rot.

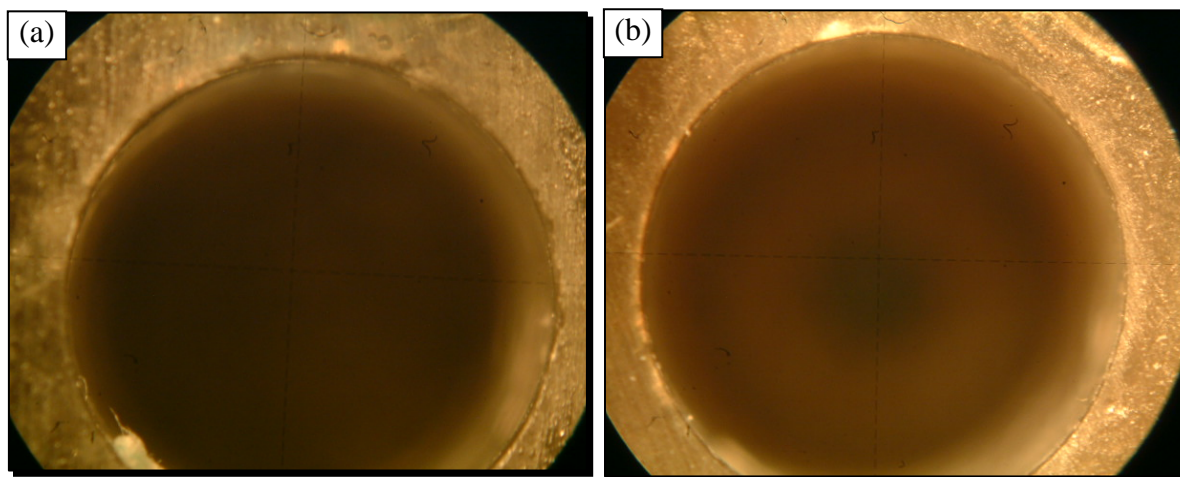


Figura 7.22 – Efeito da matriz (a) ortoftálica *Viapal Vup 9731* e (b) bisfenólica *ATLAC 382-05* no dano à entrada do furo para uma velocidade de corte de 71m/min e avanço de 0.2mm/rot

De acordo com a figura, observa-se que a utilização da broca especial “*Brad & Spur*” na realização dos furos conduz a um dano reduzido à entrada do furo. Verifica-se também que o compósito de matriz ortoftálica *Viapal Vup 9731* apresenta um dano ligeiramente inferior ao obtido para o compósito de matriz bisfenólica para os mesmos parâmetros de corte, estando relacionado com as propriedades mecânicas da matriz.

Na Tabela 7.5 apresentam-se os resultados obtidos através da equação (4.2) para o factor de delaminação ($F_{d\text{ entrada}}$) à entrada do furo, rugosidade média aritmética (R_a) e amplitude máxima do perfil de rugosidade (R_t), em função dos parâmetros processuais (V_c e a), para ambos os compósitos de matriz polimérica, ortoftálica - *Viapal Vup 9731* e bisfenólica - *ATLAC 382-05*.

Tabela 7.5 – Resultados obtidos para o factor de delaminação ($F_{d \text{ entrada}}$) à entrada do furo, rugosidade média aritmética (R_a) e amplitude máxima do perfil de rugosidade (R_t) para ambos os compósitos

Velocidade de corte [m/min]	Avanço [mm/rot]	$F_{d \text{ entrada}}$		$R_a [\mu\text{m}]$		$R_t [\mu\text{m}]$	
		Viapal VUP 9731	ATLAC 382-05	Viapal VUP 9731	ATLAC 382-05	Viapal VUP 9731	ATLAC 382-05
55	0.05	1.024	1.030	5.88	6.87	66.47	68.02
	0.1	1.034	1.043	6.12	7.16	73.21	74.58
	0.2	1.060	1.071	6.52	7.56	81.50	83.44
71	0.05	1.036	1.035	5.25	5.85	47.40	56.75
	0.1	1.047	1.052	5.44	6.30	51.97	62.30
	0.2	1.063	1.065	5.80	7.13	69.78	78.04
86	0.05	1.048	1.050	4.42	5.31	38.39	45.80
	0.1	1.060	1.065	4.92	5.80	47.37	50.35
	0.2	1.080	1.084	5.27	6.23	63.93	61.26

Na Figura 7.23, observa-se a evolução do factor de delaminação à entrada do furo ($F_{d \text{ entrada}}$) em função do avanço para diferentes velocidades de corte, para ambos os compósitos de matriz polimérica, ortoftálica - *Viapal Vup 9731* e bisfenólica - *ATLAC 382-05*.

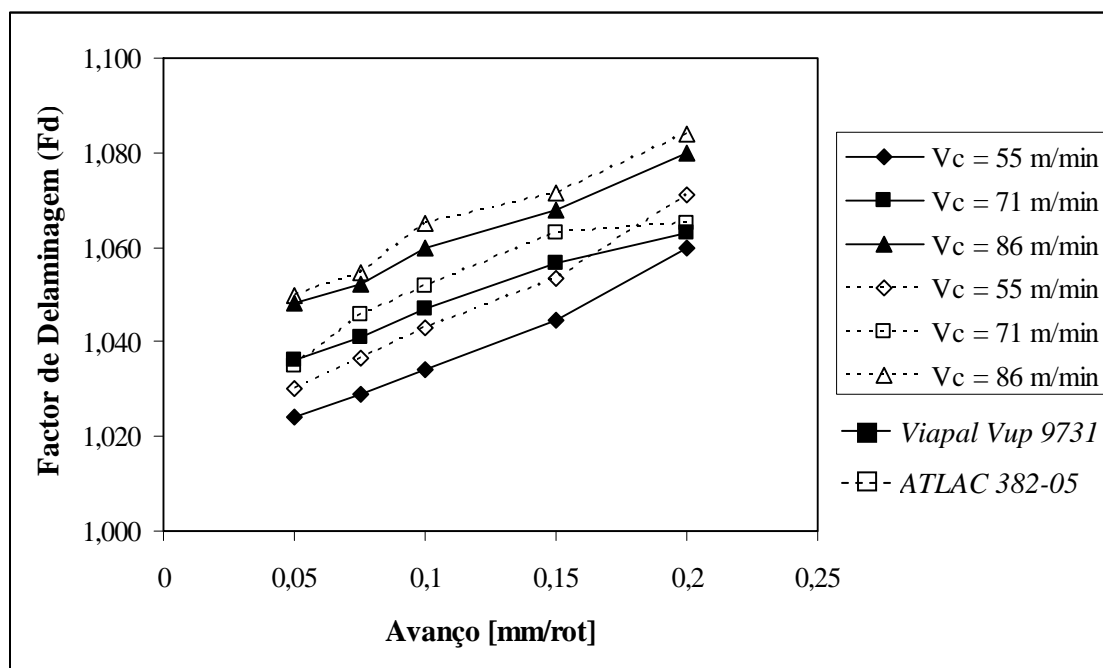


Figura 7.23 – Evolução do factor de delaminação à entrada do furo em função do avanço para diferentes velocidades de corte

De acordo com os resultados obtidos na Figura 7.23, verifica-se, de um modo geral, que o compósito com matriz ortoftálica – *Viapal Vup 9731*, apresenta valores ligeiramente inferiores aos obtidos para o compósito com matriz bisfenólica – *ATLAC 382-05*. Deste modo, verifica-se que a matriz apresenta pouca influência no dano à entrada do furo.

A evolução da rugosidade média aritmética (R_a) e amplitude máxima do perfil de rugosidade (R_t), em função do avanço para diferentes velocidades de corte é apresentada nas Figuras 7.24 e 7.25, respectivamente, para ambos os compósitos de matriz polimérica, ortoftálica - *Viapal Vup 9731* e bisfenólica - *ATLAC 382-05*.

Através da Figura 7.24, observa-se que o compósito com matriz ortoftálica - *Viapal Vup 9731* apresenta valores de rugosidade média aritmética inferiores aos obtidos pelo compósito com matriz bisfenólica – *ATLAC 382-05*, ou seja, a matriz ortoftálica permite obter melhor acabamento da superfície para as mesmas condições de corte.

Igualmente pela Figura 7.25 podemos corroborar o raciocínio apresentado anteriormente para a evolução da amplitude máxima do perfil de rugosidade (R_t), ou seja, o compósito com matriz ortoftálica - *Viapal Vup 9731* apresenta valores de amplitude máxima do perfil

de rugosidade inferiores aos obtidos pelo compósito com matriz bisfenólica – *ATLAC 382-05*.

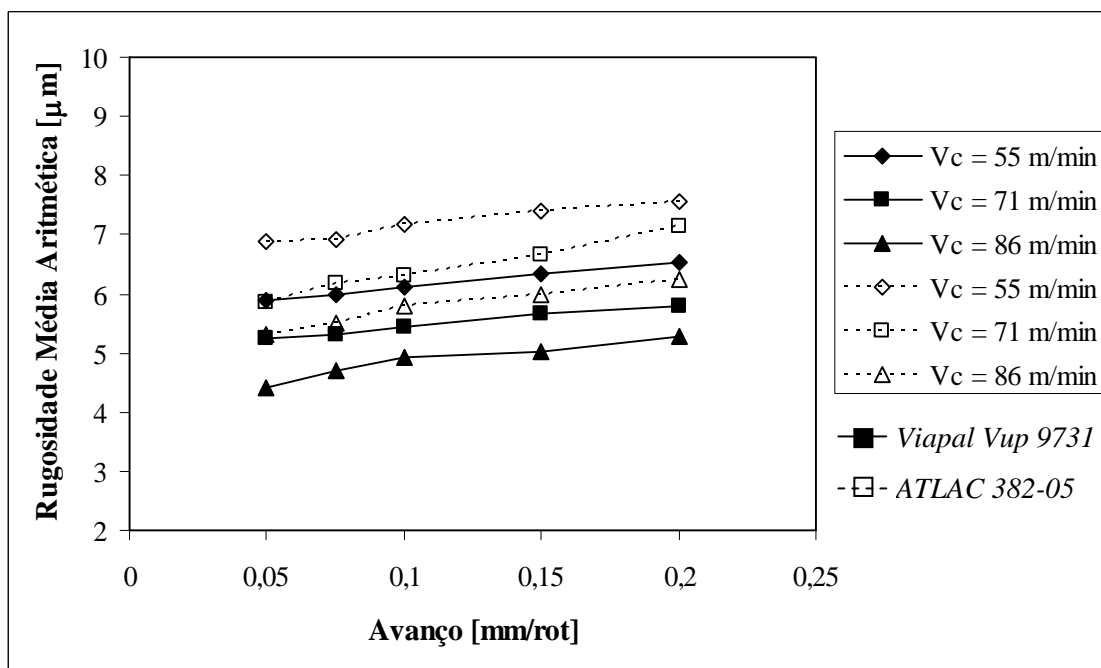


Figura 7.24 – Evolução da rugosidade média aritmética do furo em função do avanço para diferentes velocidades de corte

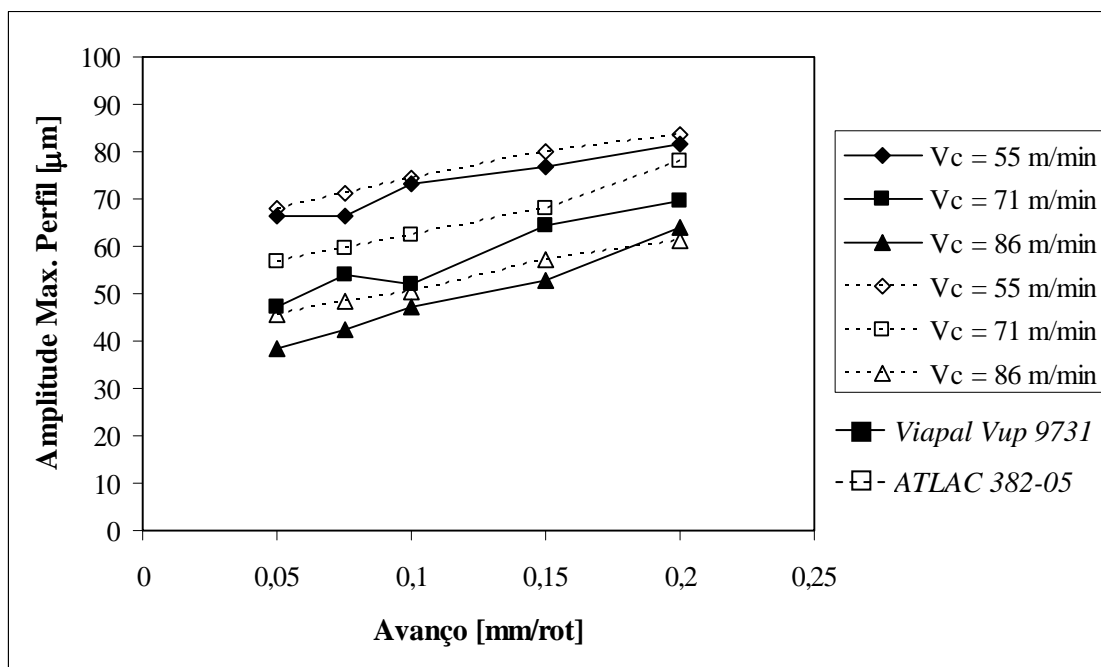


Figura 7.25 – Evolução da amplitude máxima de perfil de rugosidade do furo em função do avanço para diferentes velocidades de corte

Os resultados apresentados anteriormente demonstram que o material compósito de matriz ortoftálica apresenta resultados ligeiramente inferiores aos obtidos com compósito de matriz bisfenólica, ao nível do dano (F_d) e acabamento de superfície (R_a e R_t), derivado da resistência da matriz.

7.3.2 Forças de Corte

A medição e a aquisição das forças geradas no processo de corte (*furação*) foi efectuada através do dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9272, e do seu respectivo sistema de aquisição de dados.

Para avaliar a furação dos materiais compósitos relativa ao processo de corte foi determinada a força específica de corte (K_s) e a potência de corte (P_c). A força específica de corte e potência de corte anteriormente definidas foram calculadas através da equação (2.10) e (2.11), respectivamente.

Na Figura 7.26 observa-se o efeito da matriz polimérica nas forças de corte (F_z , e M_z) durante a operação de furação com a broca especial “*Brad & Spur*”, utilizando uma velocidade de corte de 71m/min e avanço 0.2mm/rot, para os materiais compósitos de diferente matriz, ortoftálica - *Viapal Vup 9731* e bisfenólica - *ATLAC 382-05*, respectivamente.

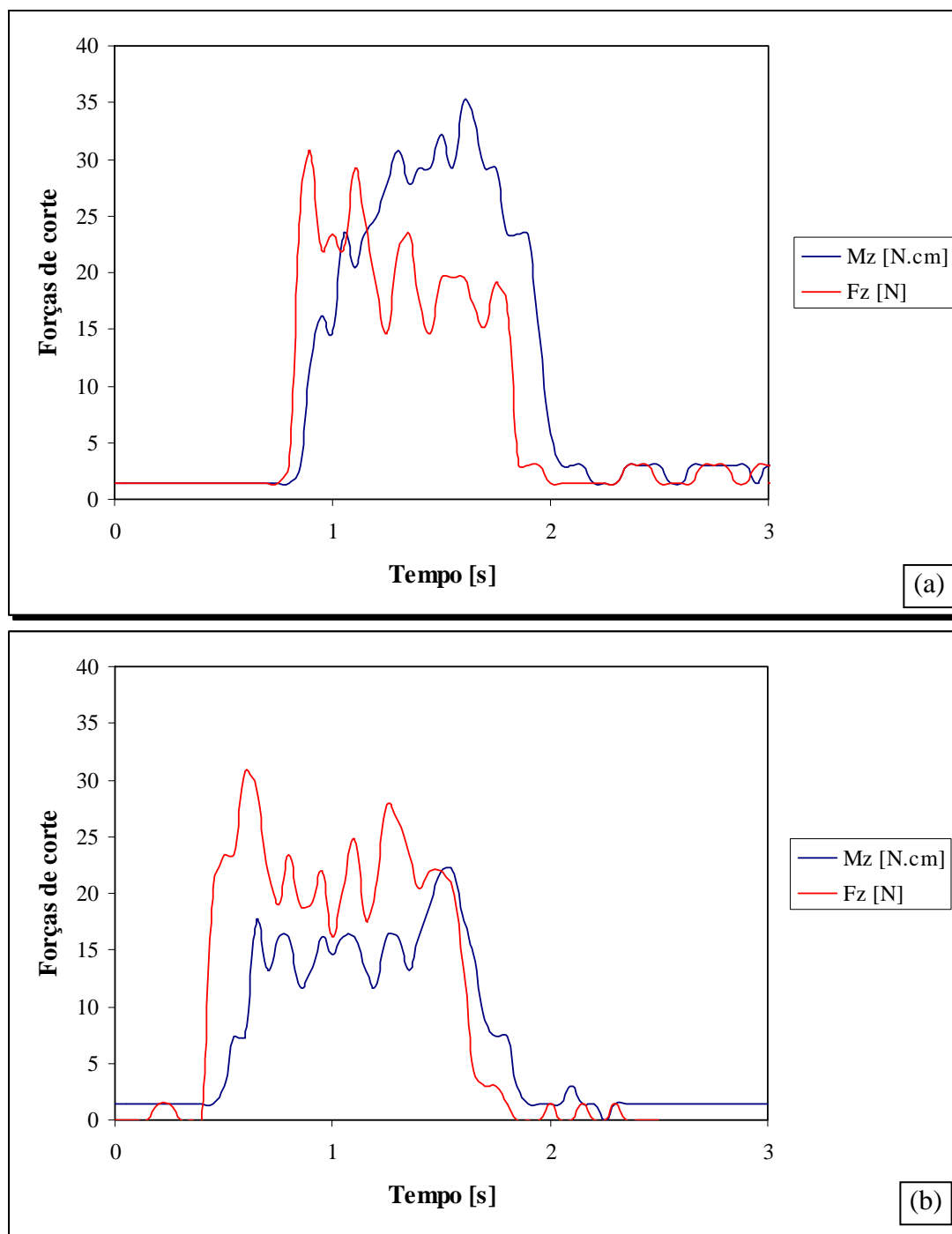


Figura 7.26 – Efeito da matriz (a) ortoftálica – *Viapal Vup 9731* e (b) bisfenólica – *ATLAC 382-05*, nas forças de corte para uma velocidade de corte de 71m/min e um avanço de 0.2mm/rot

Verifica-se que, para as mesmas condições de corte, as forças de corte geradas no processo de furação para ambos os compósitos apresentam valores praticamente na mesma ordem de grandeza. Verifica-se também que o compósito de matriz ortoftálica, contrariamente ao

que sucede com o compósito de matriz bisfenólica, apresenta o valor máximo para o binário a meio do furo. Este facto está relacionado com as propriedades e heterogeneidade do material, dado que o compósito de matriz ortoftálica apresenta uma resistência à compressão superior, conduzindo a uma força de corte também superior face à resistência do material ao corte. Relativamente à força de avanço, ambos os materiais compósitos apresentam uma evolução similar, ou seja, valores máximos no início do furo seguido de uma descida e oscilação dos valores durante o furo.

Na Tabela 7.4 apresentam-se os resultados obtidos para a força de avanço (F_z), força específica de corte (K_s) e potência de corte (P_c) em função dos parâmetros processuais (V_c e a), para ambos os materiais compósitos de diferente matriz, ortoftálica - *Viapal Vup 9731* e bisfenólica - *ATLAC 382-05*.

Tabela 7.6 – Resultados obtidos para a força de avanço, força específica de corte e potência de corte, para ambos os compósitos

Velocidade de corte [m/min]	Avanço [mm/rot]	F_z [N]		K_s [MPa]		P_c [kW]	
		Viapal VUP 9731	ATLAC 382-05	Viapal VUP 9731	ATLAC 382-05	Viapal VUP 9731	ATLAC 382-05
55	0.05	6.27	8.09	943.81	1419.04	54.07	81.31
	0.1	8.67	11.78	415.39	670.86	47.60	76.87
	0.2	20.77	23.14	229.80	379.86	52.66	86.94
71	0.05	7.43	12.35	878.50	1230.14	57.70	90.98
	0.1	12.25	15.79	420.78	646.56	62.24	95.58
	0.2	18.83	16.99	195.04	330.06	64.97	97.64
86	0.05	6.13	9.87	980.10	1010.00	76.43	93.51
	0.1	9.28	12.37	426.56	567.38	77.38	101.62
	0.2	18.87	19.25	215.94	306.25	87.80	109.80

A evolução da força de avanço (F_z) e força específica de corte (K_s), em função do avanço para diferentes velocidades de corte é apresentada nas Figuras 7.27 e 7.28, respectivamente, para os materiais compósitos de diferente matriz, ortoftálica - *Viapal Vup 9731* e bisfenólica - *ATLAC 382-05*.

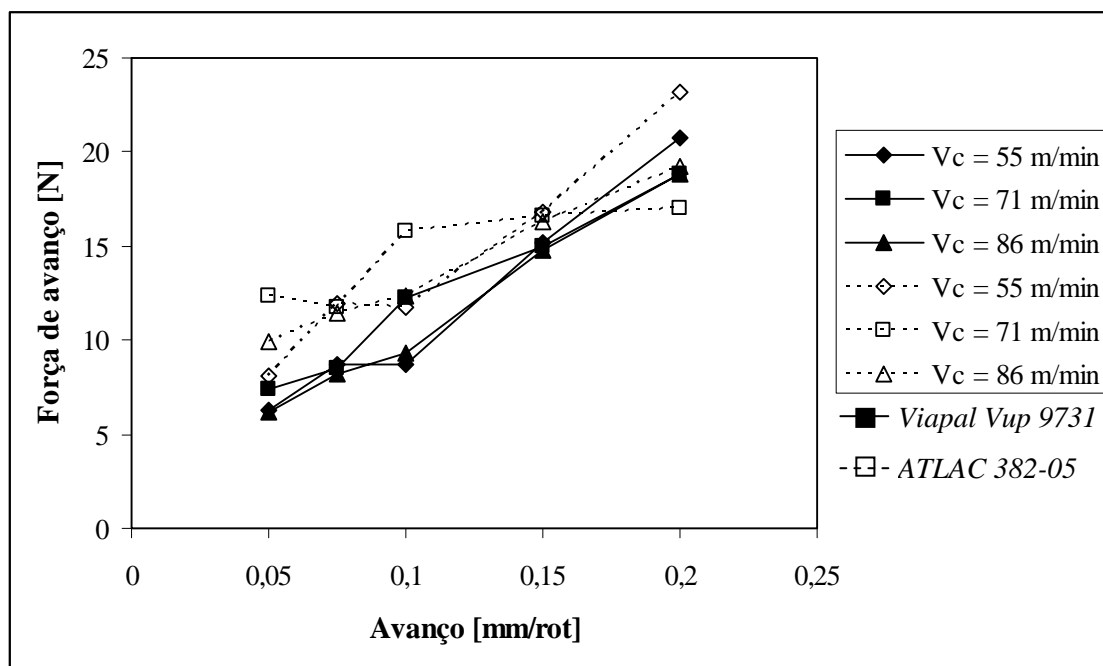


Figura 7.27 – Evolução da força de avanço em função do avanço para ambos os materiais compósitos

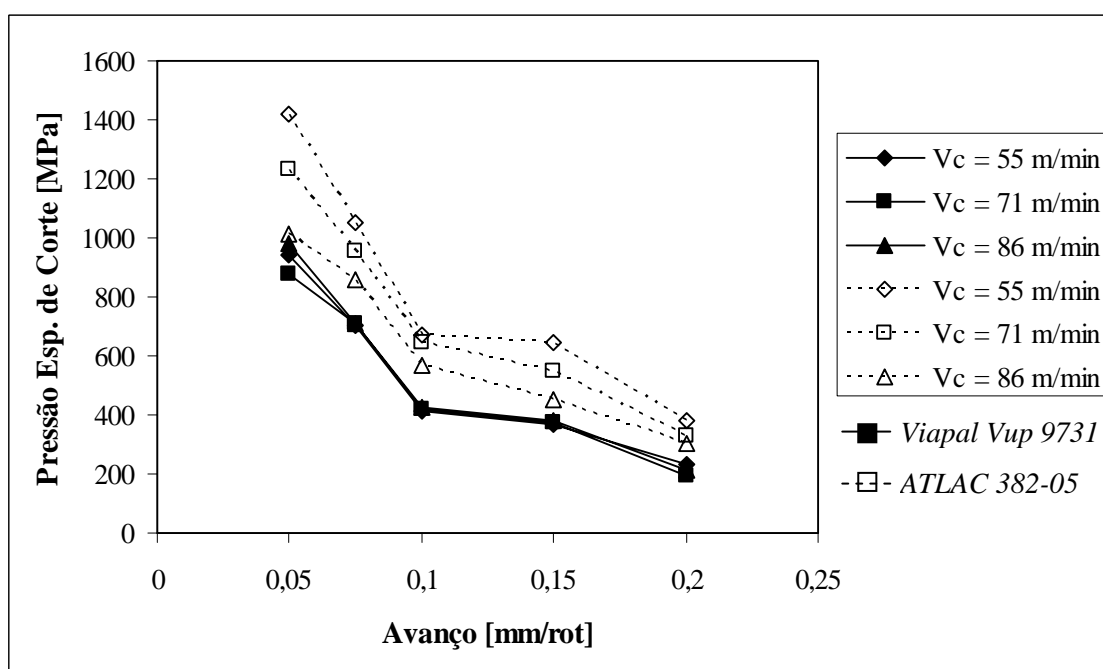


Figura 7.28 – Evolução da força específica de corte em função do avanço para ambos os materiais compósitos

De acordo com os resultados obtidos na Figura 7.27, verifica-se que o compósito de matriz ortoftálica apresenta valores ligeiramente inferiores relativamente ao compósito de matriz

bisfenólica para os mesmos parâmetros processuais. A razão dos resultados obtidos advém das propriedades e heterogeneidade do material compósito.

Através da Figura 7.28, observa-se que o compósito de matriz ortoftálica - *Viapal Vup 9731*, apresenta valores inferiores aos obtidos com o material compósito de matriz bisfenólica – *ATLAC 382-05*. No entanto, para velocidades de corte de 86m/min os valores de pressão específica de corte obtidos para o compósito de matriz bisfenólica são muito próximos aos obtidos para o compósito de matriz ortoftálica, especialmente para avanços de 0.05 e 0.15mm/rot.

Na Figura 7.29 observa-se a evolução da potência de corte (P_c) em função do avanço para diferentes velocidades de corte, para ambos os compósitos de matriz polimérica, ortoftálica - *Viapal Vup 9731* e bisfenólica - *ATLAC 382-05*. Observa-se que o compósito de matriz bisfenólica apresenta valores de potência de corte superiores aos obtidos para o compósito de matriz ortoftálica, ou seja, o compósito de matriz bisfenólica conduz a binários elevados que por sua vez origina uma potência de corte elevada.

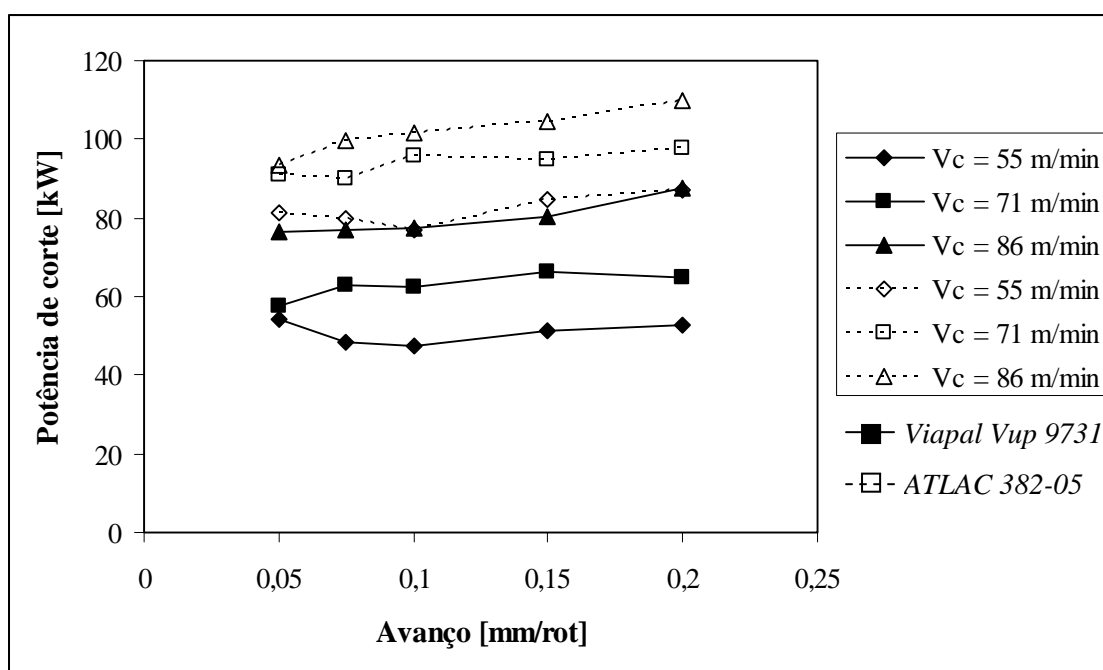


Figura 7.29 – Evolução da potencia de corte em função do avanço para diferentes velocidades de corte

Os resultados obtidos ao nível do processo de corte demonstram, de um modo geral, que o compósito de matriz ortoftálica apresenta melhor desempenho, dado que apresenta valores

de força de avanço (F_z), força específica de corte (K_s) e potência de corte (P_c), inferiores aos obtidos pelo compósito de matriz bisfenólica.

No âmbito geral, o estudo comparativo entre a matriz ortoftálica - *Viapal Vup 9731* e bisfenólica - *ATLAC 382-05* utilizada no fabrico do material compósito com 65% de reforço de fibras de vidro, demonstrou que, apesar de apresentar pouca influência no dano, o compósito de matriz ortoftálica (*Viapal Vup 9731*), apresenta melhor acabamento de superfície (R_a e R_t) e conduz a menor força e potência de corte durante a operação, comparativamente com a matriz bisfenólica (*ATLAC 382-05*).

Conclusões

No âmbito desta dissertação estudaram-se os benefícios da utilização de brocas especiais e de modelos estatísticos com vista a minimizar o defeito de delaminação e a maximizar o acabamento de superfície na parede do furo. O trabalho realizado permitiu avaliar o comportamento da furação de dois materiais compósitos de matriz polimérica, nomeadamente um compósito de matriz epóxida reforçado a fibras de carbono e dois compósitos de matriz poliéster reforçados a fibras de vidro, obtidos por diferentes processos de fabrico (*autoclave e moldação manual*), ao nível do processo de corte (*forças de corte*), do dano na peça (*defeito de delaminação*) e acabamento de superfície obtido no furo. Os resultados obtidos permitiram um avanço ao realizado na literatura, “*estado de arte*”, nomeadamente na aplicação de brocas com geometria especial, “*Brad & Spur*” e na previsão do comportamento da furação utilizando modelos estatísticos. Com esta dissertação pretende-se contribuir para uma melhoria da eficiência do processo de furação de materiais compósitos de matriz polimérica.

8.1 Conclusões

Numa primeira fase do trabalho, foi efectuada a avaliação da furação de materiais compósitos de matriz polimérica distintos numa perspectiva de avaliar a influência dos parâmetros processuais (V_c e a) e a geometria de corte (*convencional e especial*) ao nível do processo de corte (*forças de corte*), do dano (*defeito de delaminação*) e do acabamento de superfície obtido na parede do furo, a qual conduziu às seguintes conclusões:

- ❑ o aumento dos parâmetros processuais (V_c e a) conduz a um aumento do factor de delaminação à entrada e/ou saída (F_d) do furo para ambos os materiais compósitos, sendo o avanço o parâmetro que mais afecta a evolução do factor de delaminação. Por sua vez, este aumento conduz também a um aumento da força de avanço (F_z), e a uma diminuição da força específica de corte.
- ❑ a broca especial “*Brad & Spur*” apresenta valores de factor de delaminação à entrada e/ou saída do furo muito inferiores aos obtidos pelas brocas helicoidais “*Straight Shank*” e “*Stub Length*” em ambos os materiais compósitos.
- ❑ o defeito de delaminação à entrada é superior ao da saída, especialmente para a broca helicoidal “*Straight Shank*”.
- ❑ a broca especial “*Brad & Spur*” apresenta, em ambos os materiais compósitos, forças de corte inferiores às obtidas pelas brocas helicoidais “*Straight Shank*” e “*Stub Length*”.
- ❑ o factor de delaminação à entrada ($F_{d \text{ entrada}}$) é extremamente dependente da força de avanço gerada no processo de corte, ou seja, o aumento da força de avanço conduz a um aumento significativo do factor de delaminação. Verificou-se também que o factor de delaminação à entrada diminui com o aumento da força específica de corte.
- ❑ a rugosidade média aritmética (R_a) apresenta uma evolução distinta em função dos parâmetros processuais, ou seja, aumenta com o avanço e diminui com a velocidade de corte.
- ❑ a broca especial “*Brad & Spur*” conduz a valores de rugosidade média aritmética (R_a) na parede do furo inferiores aos obtidos pela broca helicoidal “*Stub Length*”, ou seja, a geometria de corte permite obter melhor acabamento de superfície para as mesmas condições de corte.
- ❑ a broca especial “*Brad & Spur*” apresenta melhor desempenho ao nível do processo de corte, do dano (*defeito de delaminação*) e qualidade de superfície (*acabamento de superfície*) no furo relativamente às brocas helicoidais, constituindo desta forma a escolha adequada para a furação de materiais compósitos de matriz polimérica.

- ❑ o modelo estatístico desenvolvido revelou que o parâmetro processual avanço (a) contribui de uma forma significativa, isto é, apresenta grande influência no factor de delaminação (F_d) à entrada, na força de avanço (F_z) e na força específica de corte (K_s), para ambos os materiais compósitos. No entanto, para o factor de delaminação à saída e para a rugosidade média aritmética (R_a), a velocidade de corte é o factor que apresenta maior influência.
- ❑ as equações obtidas por regressão linear múltipla permitem obter uma boa correlação do factor de delaminação, da força de avanço, da força específica de corte e da rugosidade média aritmética com os parâmetros processuais (V_c e a).
- ❑ a obtenção de furos com boa qualidade em materiais compósitos de matriz polimérica, isto é, com o mínimo defeito de delaminação e bom acabamento de superfície na parede do furo, passa pela utilização de ferramentas de corte especial “*Brad & Spur*”, de velocidades de corte moderadas e baixos avanços e pelo controle da força de avanço ao longo do furo.

Numa segunda fase, realizou-se o estudo comparativo entre a matriz, *bisfenólica - ATLAC 382-05* e *ortoftálica - Viapal VUP 9731* utilizadas no fabrico de compósitos reforçados a fibras de vidro com aplicação em diversos campos da indústria, de forma a avaliar a sua influência no defeito de delaminação (F_d), no acabamento de superfície (R_a , R_t) obtido na parede do furo e nas forças e potência de corte (F_z , K_s e P_c) geradas durante o processo de corte, o qual conduziu às seguintes conclusões:

- ❑ o compósito com matriz ortoftálica –*Viapal Vup 9731*, apresenta valores de factor de delaminação (F_d), rugosidade média aritmética (R_a) e amplitude máxima do perfil de rugosidade (R_t) ligeiramente inferiores aos obtidos pelo compósito com matriz bisfenólica – *ATLAC 382-05*, demonstrando que a matriz termoendurecível apresenta pouca influência no defeito de delaminação à entrada do furo, no entanto, permite obter melhor acabamento de superfície para as mesmas condições de corte.
- ❑ o compósito de matriz ortoftálica - *Viapal Vup 9731* apresenta valores de força de avanço (F_z) e força específica de corte (K_s) e potência de corte (P_c) inferiores aos

obtidos pelo compósito de matriz bisfenólica para as mesmas condições de corte. A razão dos resultados obtidos advém das propriedades e heterogeneidade do material compósito.

- ❑ o aumento dos parâmetros processuais (V_c e a) conduz a um aumento do factor de delaminação à entrada ($F_{d \text{ entrada}}$) do furo para ambos os compósitos de matriz termoendurecível. Por sua vez, este aumento conduz também a um aumento da força de avanço (F_z), da potência de corte (P_c) e a uma diminuição da força específica de corte.

8.2 Perspectivas de Trabalho Futuro

Na sequência do trabalho realizado no decorrer desta dissertação, novos desafios e desenvolvimentos são passíveis de um estudo aprofundado com o objectivo de realizar furos com boa qualidade:

- ❑ desenvolver um novo parâmetro de avaliação para o dano (*defeito de delaminação*).
- ❑ avaliação das vibrações associadas ao processo no defeito de delaminação e na qualidade de superfície do furo.
- ❑ avaliação da técnica da variação do avanço ao longo do furo de forma a minimizar o defeito de delaminação.
- ❑ o recurso à simulação numérica do processo de furação no sentido de realizar furos com boa qualidade, sem o defeito de delaminação.
- ❑ o recurso a algoritmos genéticos com vista a optimizar os parâmetros processuais.

Referências

- [Adams, 1996] Adams, L., *Efficient method for unsupported drilling of composites*, The 41st International SAMPE Symposium, pp.1496-1502, 1996.
- [Alexis, 1995] Alexis, J., *Pratique industrielle de la méthode Taguchi, les plans d'expériences*, AFNOR, pp.1-143, 1995.
- [Alting, 1994] Alting, L., *Manufacturing Engineering Processes*, Inc. Marcel Dekker, pp.95-100, 1994.
- [Arola and Ramula, 1994] Arola, D., and Ramula, M., *Machining-induced surface texture effects on the flexural properties of a graphite-epoxy laminate*, Composites, **25(8)**, pp.822-834, 1994.
- [ASM-International, 1987] ASM-International, *Engineered Materials Handbook-Composites*, pp.43-168, 1987.
- [Berins, 1991] Berins, M., *SPI - Plastics Engineering Handbook of the Society of Plastics Industry*, Kluwer, pp.511-528, 1991.
- [Bhatnagar et al., 2004a] Bhatnagar, N., Nayak, D., Singh, I., Chouhan, H. and Mahajan, P., *Determination of machining-induced damage characteristics of fiber reinforced plastic composite laminates*, Materials and Manufacturing Processes, **19(6)**, pp.1009-1023, 2004a.

- [Bhatnagar et al., 2004b] Bhatnagar, N., Singh, I. and Nayak, D., *Damage investigation in drilling of glass fiber reinforced plastic composite laminates*, Materials and Manufacturing Processes, **19(6)**, pp.995-1007, 2004b.
- [Bill et al., 2002] Bill, B., Gossweiler, C., Kierchheim, A., and Otter, D., *Piezoelectric Sensors -Extending functionality and simplifying applications with Microelectronics*, Kistler Instrumente AG Winterthur and Schweiz Special print SD920-228e-05.02, pp.1-13, 2002.
- [Boothroyd and Knight, 1989] Boothroyd, G., and Knight, W. A., *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, Marcel Dekker, 1989.
- [Brinksmeier and Janssen, 2002] Brinksmeier, E., and Janssen, R., *Drilling of multi-layer composite materials consisting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP), titanium and aluminum alloys*, Cirp Annals-Manufacturing Technology, **51(1)**, pp.87-90, 2002.
- [Brookes, 1996] Brookes, K. J. A., *World Directory and Handbook of Hard Metals and Hard Materials*, International Carbide Data, 1996.
- [Capello, 2004] Capello, E., *Workpiece damping and its effect on delamination damage in drilling thin composite laminates*, Journal of Materials Processing Technology, **148(2)**, pp.186-195, 2004.
- [Capello and Tagliaferri, 2001] Capello, E., and Tagliaferri, V., *Drilling damage of GFRP and residual mechanical behavior - Part 1: Drilling damage generation*, Journal of Composites Technology & Research, **23(2)**, pp.122-130, 2001.
- [Caprino and Tagliaferri, 1995] Caprino, G., and Tagliaferri, V., *Damage development in drilling glass fiber-reinforced plastics*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **35(6)**, pp.817-829, 1995.

- [Chambers and Bishop, 1995] Chambers, A., and Bishop, G., The drilling of carbon fibre polymer matrix composites, ICCM, pp.565-72, 1995.
- [Chandrasekharan et al., 1995] Chandrasekharan, V., Kapoor, S. G., and DeVor, R. E., *A mechanistic approach to predicting the cutting forces in drilling: With application to fiber-reinforced composite materials*, Journal of Engineering for Industry-Transactions of the Asme, **117(4)**, pp.559-570, 1995.
- [Chawla, 1987] Chawla, K. K., *Composite Materials Science and Engineering*, Springer-Verlag, pp.6-163, 1987.
- [Chen, 1997] Chen, W. C., *Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **37(8)**, pp.1097-1108, 1997.
- [Childs et al., 2000] Childs, T. H. C., Maekawa, K., Obikawa, T., and Yamane, Y., *Metal Machining - Theory and Applications*, Arnold Publisher, 2000.
- [Davim and Reis, 2003a] Davim, J. P., and Reis, P., *Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave - experimental and statistical study*, Materials & Design, **24(5)**, pp.315-324, 2003a.
- [Davim and Reis, 2003b] Davim, J. P., and Reis, P., *Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments*, Composite Structures, **59(4)**, pp.481-487, 2003b.
- [Davim et al., 2004a] Davim, J. P., Reis, P. and Antonio, C. C., *Drilling fiber reinforced plastics (FRPs) manufactured by hand lay-up: influence of matrix (Viapal VUP 9731 and ATLAC 382-05)*, Journal of Materials Processing Technology, **155-156**, 1828-1833, 2004a.

- [Davim et al., 2004b] Davim, J. P., Reis, P. and Antonio, C. C., *Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up*, Composites Science and Technology, **64(2)**, pp.289-297, 2004b.
- [Dharan and Won, 2000] Dharan, C. K. H., and Won, M. S., *Machining parameters for an intelligent machining system for composite laminates*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **40(3)**, pp.415-426, 2000.
- [Di llio et al., 1992] Di llio, A., Tagliaferri, V., and Veniali, F., *Progress in drilling of composite materials*, Machining of Composite Materials Symp. ASM Materials Week, pp.199-203, 1992.
- [Edwards, 1993] Edwards, R., *Cutting Tools*, The Institute of Materials, 1993.
- [El-Sonbaty et al., 2004] El-Sonbaty, I., Khashaba, U. A., and Machaly, T., *Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites*, Composite Structures, **63(3-4)**, pp.329-338, 2004.
- [Ema et al., 1988] Ema, S., Fujii, H., Marui, E., and Kato, S., *New type drill with 3 major cutting edges*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **28(4)**, pp.461-473, 1988.
- [Enemuoh and El-Gizawy, 2003] Enemuoh, E. U., and El-Gizawy, A. S., *Optimal neural network model for characterization of process-induced damage in drilling carbon fiber reinforced epoxy composites*, Machining Science and Technology, **7(3)**, pp.389-400, 2003.

- [Enemuoh *et al.*, 2001] Enemuoh, E. U., El-Gizawy, A. S., and Okafor, A. C., *An approach for development of damage-free drilling of carbon fiber reinforced thermosets*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **41(12)**, pp.1795-1814, 2001.
- [Fernandes and Cook, 2005] Fernandes, M., and Cook, C., *Drilling of carbon composites using a one shot drill bit, Part I: Five stage representation of drilling and factors affecting maximum force and torque*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **46(1)**, pp.70-75, 2005.
- [Ferraresi, 1977] Ferraresi, D., *Fundamentos de Usinagem dos Metais*, Edgard Blucher and Lda, 1977.
- [Figueiredo and Fernandes, 1996] Figueiredo, M. A. V., and Fernandes, A. A., *O método de Taguchi no planeamento e análise de operações de soldadura*, Ingenium-Agosto/Setembro, pp.79-85, 1996.
- [Flinn and Trojan, 1995] Flinn, R. A., and Trojan, P. K., *Engineering Materials and Their Applications*, John Wiley & Sons and Inc., pp.539-676, 1995.
- [Gadelmawla *et al.*, 2002] Gadelmawla, E. S., Koura, M. M., Maksoud, T. M. A., Elewa, I. M. and Soliman, H. H., *Roughness parameters*, Journal of Materials Processing Technology, **123(1)**, pp.133-145, 2002.
- [Gao and Kim, 1999] Gao, S. L. and Kim, J. K., *Scanning acoustic microscopy as a tool for quantitative characterisation of damage in CFRPs*, Composites Science and Technology, **59(3)**, pp.345-354, 1999.
- [Groover, 1996] Groover, M. P., *Fundamentals of Modern Manufacturing - Materials, Process and Systems*, Prentice-Hall International Editions, 1996.

- [Guimaraes and Cabral, 1997] Guimarães, R. C., and Cabral, J. A. S., *Estatística*, MacGraw-Hill, pp.507-539, 1997.
- [Hocheng and Dharan, 1990] Hocheng, H. and Dharan, C. K. H., *Delamination during drilling in composite laminates*, Journal of Engineering for Industry-Transactions of the Asme, **112(3)**, pp.236-239, 1990.
- [Hocheng and Puw, 1992] Hocheng, H. and Puw, H. Y., *On drilling characteristics of fiber-reinforced thermoset and thermoplastics*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **32(4)**, pp.583-592, 1992.
- [Hocheng and Puw, 1993] Hocheng, H., and Puw, H. Y., *Machinability of fiber-reinforced thermoplastics in drilling*, Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the Asme, **115(1)**, pp.146-149, 1993.
- [Hocheng et al., 1992] Hocheng, H., Puw, H. Y. and Yao, K. C., *Experimental aspects of drilling of some fiber-reinforced plastics*, ASM Materials week, pp.127-138, 1992.
- [Ho-Cheng et al., 1993] Ho-Cheng, H., Pwu, H. Y. and Yao, K. C., *Machinability of some fiber reinforced thermoset and thermoplastics in drilling*, Materials Manufacturing Process, **8(6)**, pp.653-682, 1993.
- [Hocheng and Tsao, 2003] Hocheng, H. and Tsao, C. C., *Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits*, Journal of Materials Processing Technology, **140**, pp. 335-339, 2003.
- [Inoue et al., 1997] Inoue, H., Aoyama, E., Hirogaki, T., Ogawa, K., Matsushita, H., Kitahara, Y. and Katayama, T., *Influence of tool wear on internal damage in small diameter drilling in GFRP*, Composite Structures, **39(1-2)**, pp. 55-62, 1997.

- [Jahanmir et al., 1999] Jahanmir, S., Ramulu, M. and Koshy, P., *Machining of Ceramics and Composites*, Marcel Dekker, pp.209-295, 1999.
- [Jain and Yang, 1993] Jain, S. and Yang, D. C. H., *Effects of feedrate and chisel edge on delamination in composites drilling*, Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME, **115(4)**, pp.398-405, 1993.
- [Jain and Yang, 1994] Jain, S. and Yang, D. C. H., *Delamination-free drilling of composite laminates*, Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME, **116(4)**, pp.475-481, 1994.
- [Jain et al., 1991] Jain, V. K., Rao, P. S., Choudhary, S. K. and Rajurkar, K. P., *Experimental investigations into traveling wire electrochemical spark machining (Tw-Ecsm) of composites*, Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME, **113(1)**, pp.75-84, 1991.
- [Jung et al., 2005] Jung, J. P., Kim, G. W. and Lee, K. Y., *Critical thrust force at delamination propagation during drilling of angle-ply laminates*, Composite Structures, **68(4)**, pp.391-397, 2005.
- [Kalpakjian, 1995] Kalpakjian, S., *Manufacturing Engineering and Technology*, Addison-Wesley, 1995.
- [Khashaba, 2004] Khashaba, U. A., *Delamination in drilling GFR-thermoset composites*, Composite Structures, **63(3-4)**, pp.313-327, 2004.
- [Kim and Ramulu, 2004] Kim, D., and Ramulu, M., *Drilling process optimization for graphite/bismaleimide-titanium alloy stacks*, Composite Structures, **63(1)**, pp.101-114, 2004.

- [Koenig and Grass, 1989] Koenig, W. and Grass, P., *Quality definition and assessment in drilling of fibre reinforced thermosets*, Ann CIRP, **38**, pp.119-124, 1989.
- [Koenig et al., 1985] Koenig, W., Wulf, C., Grass, P. and Willerschied, H., *Machining of fiber reinforced plastics*, Ann CIRP, **34(2)**, pp.537-548, 1985.
- [Komanduri, 1993] Komanduri, R., *Machining fiber-reinforced composites*, Mechanical Engineering, **115(4)**, pp.58-64, 1993.
- [Komanduri et al., 1991] Komanduri, R., Zhang, B. and Vissa, C. M., *Machining of fiber reinforced composites*, Process. Manuf. Comp. Mater, **49(27)**, pp.1-36, 1991.
- [Kumme et al., 2003a] Kumme, R., Mack, O., Bill, B., Gossweiler, C. H. and Haab, H. R., *Dynamic properties and investigations of piezoelectric force measuring devices*, Kistler Instrumente AG, Switzerland and Tech Note - SD920-233e-12.03, pp.1-12, 2003a.
- [Kumme et al., 2003b] Kumme, R., Mack, O., Bill, B., Haab, H. R. and Gossweiler, C. H., *Investigation of piezoelectric force measuring devices in force calibration and force standard machines*, Kistler Instrumente AG and Switzerland Tech Note-SD 920-232e-12.03, pp.1-12, 2003b.
- [Kuratle and Signer, 1999] Kuratle, R., H. and Signer, A., *The basic of piezoelectric measurement technology*, Kistler Instrumente AG Winterthur, Switzerland and SD- 20.188e 7.99, pp.1-5, 1999.
- [Lachaud et al., 2001] Lachaud, F., Piquet, R., Collombet, F. and Surcin, L., *Drilling of composite structures*, Composite Structures, **52(3-4)**, pp.511-516, 2001.

- [Langella et al., 2005] Langella, A., Nele, L. and Maio, A., *A torque and thrust prediction model for drilling of composite materials*, Composites Part a-Applied Science and Manufacturing, **36(1)**, pp.83-93, 2005.
- [Lin and Chen, 1996] Lin, S. C. and Chen, I. K., *Drilling carbon fiber-reinforced composite material at high speed*, Wear, **194(1-2)**, pp.156-162, 1996.
- [Lin and Shen, 1999] Lin, S. C. and Shen, J. M., *Drilling unidirectional glass fiber-reinforced composite materials at high speed*, Journal of Composite Materials, **33(9)**, pp.827-851, 1999.
- [Linbo et al., 2003] Linbo, Z., Lijiang, W. and Xin, W., *Study on vibration drilling of fiber reinforced plastics with hybrid variation parameters method*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, **34(3)**, pp.237-244, 2003.
- [Low and Li, 1996] Low, I. M. and Li, X. S., *Advanced ceramic tools for machining application - II*, Trans Tech Publications, 1996.
- [Malhotra, 1990] Malhotra, S. K., *Some Studies on drilling of fibrous composites*, Journal of Materials Processing Technology, **24**, pp.291-300, 1990.
- [Mallick, 1993] Mallick, P. K., *Fiber-reinforced composites*, Marcel Dekker and Inc, pp.1-91, 1993.
- [Mander and Bhattacharyya, 1993] Mander, S. J., and Bhattacharyya, D., *Drilling of kevlar composites*, ASM 1993 Materials Congr., pp.87-94, 1993.
- [Mathew et al., 1999a] Mathew, J., Ramakrishnan, N. and Naik, N. K., *Investigations into the effect of geometry of a trepanning tool on thrust and torque during drilling of GFRP composites*, Journal of Materials Processing Technology, **91(1-3)**, pp.1-11, 1999a.

- [Mathew *et al.*, 1999b] Mathew, J., Ramakrishnan, N. and Naik, N. K., *Trepanning on unidirectional composites: delamination studies*, Composites Part a-Applied Science and Manufacturing, **30(8)**, pp.951-959, 1999b.
- [Mehta *et al.*, 1992] Mehta, M., Reinhart, T. J. and Soni, A. H., Effect of fastener hole drilling anomalies on structural integrity of PMR-15/Gr composite laminates, the Machining Composite Materials Symposium, ASM Materials Week, pp.113-126, 1992.
- [Mohan *et al.*, 2005] Mohan, N. S., Ramachandra, A. and Kulkarni, S. M., *Machining of fiber-reinforced thermoplastics: influence of feed and drill size on thrust force and torque during drilling*, Journal of Reinforced Plastics and Composites, **24(12)**, pp.1247-1257, 2005.
- [Nobe *et al.*, 1998] Nobe, H., Aoyama, E., Inoue, H., Hirogaki, T., Kitahara, Y., Katayama, T., Gunjima, M., Ogawa, K. and Okuno, Y., *Study on cause of internal damage of drilled GFRP (in case of small diameter drilling of plain woven cloth)*, Polymer Blends and Polymer Composites, **137**, pp.123 -130, 1998.
- [Ogawa *et al.*, 1997] Ogawa, K., Aoyama, E., Inoue, H., Hirogaki, T., Nobe, H., Kitahara, Y., Katayama, T., and Gunjima, M., *Investigation on cutting mechanism in small diameter drilling for GFRP (thrust force and surface roughness at drilled hole wall)*, Composite Structures, **38(1-4)**, pp.343-350, 1997.
- [Park *et al.*, 1995] Park, K. Y., Choi, J. H. and Lee, D. G., *Delamination-free and high-efficiency drilling of carbon fiber-reinforced plastics*, Journal of Composite Materials, **29(15)**, pp.1988-2002, 1995.

- [Persson et al., 1997a] Persson, E., Eriksson, I. and Hammersberg, P., *Propagation of hole machining defects in pin-loaded composite laminates*, Journal of Composite Materials, **31(4)**, pp.383-408, 1997a.
- [Persson et al., 1997b] Persson, E., Eriksson, I. and Zackrisson, L., *Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates*, Composites Part a-Applied Science and Manufacturing, **28(2)**, pp.141-151, 1997b.
- [Piquet et al., 2000] Piquet, R., Ferret, B., Lachaud, F. and Swider, P., *Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills*, Composites Part a-Applied Science and Manufacturing, **31(10)**, pp.1107-1115, 2000.
- [Pirtini and Lazoglu, 2005] Pirtini, M. and Lazoglu, I., *Forces and hole quality in drilling*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **45(11)**, pp.1271-1281, 2005.
- [Ramkumar et al., 2004] Ramkumar, J., Aravindan, S., Malhotra, S. K. and Krishnamurthy, R., *An enhancement of the machining performance of GFRP by oscillatory assisted drilling*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **23(3-4)**, pp.240-244, 2004.
- [Ramkumar et al., 2001] Ramkumar, J., Krishnamurthy, R. and Malhotra, S. K., *Influence of tool status on flexural strength of machined CFRP components*, Advanced Composites Letters, **10(4)**, pp.179-187, 2001.
- [Ramulu, 1997] Ramulu, M., *Machining and surface integrity of fibre-reinforced plastic composites*, Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences, **22**, pp.449-472, 1997.

- [Ramulu et al., 2001] Ramulu, M., Branson, T. and Kim, D., *A study on the drilling of composite and titanium stacks*, Composite Structures, **54(1)**, pp.67-77, 2001.
- [Ross, 1996] Ross, P. J., *Taguchi techniques for quality engineering, loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design*, McGraw-Hill, pp.43-151, 1996.
- [Ruas, 1982] Ruas, M., *Tecnologia Mecânica - Formação Profissional*, Plátano, 1982.
- [Sakuma et al., 1984] Sakuma, K., Yokoo, Y., and Seto, M., *Study on Drilling of reinforced-plastics (GFRP and CFRP) - relation between tool material and wear behavior*, Bulletin of the Jsme-Japan Society of Mechanical Engineers, **27(228)**, pp.1237-1244, 1984.
- [Salama and ElSawy, 1996] Salama, A. S., and ElSawy, A. H., *The dynamic geometry of a twist drill point*, Journal of Materials Processing Technology, **56(1-4)**, pp.45-53, 1996.
- [Sandvik_Coromant_Tools®, 2005] Sandvik_Coromant_Tools®, *Catalogo - Produtos para Usinagem, Ferramentas Rotativas*, 2005.
- [Shackelford, 2000] Shackelford, J. F., *Introduction to Materials Science for Engineers*, Prentice Hall, pp.499-546, 2000.
- [Shaw, 1997] Shaw, M. C., *Metal Cutting Principles*, Oxford Science Publications, 1997.
- [Singh and Bhatnagar, 2005a] Singh, I., and Bhatnagar, N., *Drilling of uni-directional glass fiber reinforced plastic (UD-GFRP) composite laminates*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology (in press), 2005a.

- [Singh and Bhatnagar, 2005b] Singh, I., and Bhatnagar, N., *Drilling-induced damage in uni-directional glass fiber reinforced plastic (UD-GFRP) composite laminates*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology (in press), 2005b.
- [Smith, 1998] Smith, W. F., *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*, McGraw-Hill, pp.329-775, 1998.
- [Stephenson and Agapiou, 1997] Stephenson, D. A., and Agapiou, J. S., *Metal Cutting Theory and Practice*, Marcel Dekker, 1997.
- [Stone and Krishnamurthy, 1996] Stone, R., and Krishnamurthy, K., *A neural network thrust force controller to minimize delamination during drilling of graphite-epoxy laminates*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **36(9)**, pp.985-1003, 1996.
- [Strong, 2000] Strong, A. B., *Plastics - Materials and Processing*, Prentice Hall, pp.643-680, 2000.
- [Swartz, 1996] Swartz, M. M., *Machining of composites*, SAMPE Journal, **32(2)**, pp.18-25, 1996.
- [Tagliaferri et al., 1990] Tagliaferri, V., Caprino, G. and Diterlizzi, A., *Effect of drilling parameters on the finish and mechanical-properties of GFRP composites*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **30(1)**, pp.77-84, 1990.
- [Taguchi, 1993] Taguchi, G., *Taguchi on robust technology development methods*, ASME Press, pp.1-40, 1993.

- [Taguchi and Konishi, 1987] Taguchi, G. and Konishi, S., *Taguchi Methods, Orthogonal Arrays and Linear Graphs, Tools for Quality Engineering*, American Supplier Institute, pp.35-38, 1987.
- [Tsao and Chen, 1997] Tsao, C. C., and Chen, W. C., *Prediction of the location of delamination in the drilling of composite laminates*, Journal of Materials Processing Technology, **70(1-3)**, pp.185-189, 1997.
- [Tsao and Hocheng, 2003] Tsao, C. C., and Hocheng, H., *The effect of chisel length and associated pilot hole on delamination when drilling composite materials*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **43(11)**, pp.1087-1092, 2003.
- [Tsao and Hocheng, 2004] Tsao, C. C., and Hocheng, H., *Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **44(10)**, pp.1085-1090, 2004.
- [Tsao and Hocheng, 2005a] Tsao, C. C. and Hocheng, H., *Computerized tomography and C-Scan for measuring delamination in the drilling of composite materials using various drills*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **45(11)**, pp.1282-1287, 2005a.
- [Tsao and Hocheng, 2005b] Tsao, C. C., and Hocheng, H., *Effect of eccentricity of twist drill and candle stick drill on delamination in drilling composite materials*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **45(2)**, pp.125-130, 2005b.
- [Tsao and Hocheng, 2005c] Tsao, C. C. and Hocheng, H., *Effects of exit back-up on delamination in drilling composite materials using a saw drill and a core drill*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **45(11)**, pp.261-1270, 2005c.

- [Unal et al., 2001] Unal, M., Yakar, M. and Yildiz, F., *Discontinuity Surface Roughness Measurement Techniques and the Evaluation of Digital Photogrammetric Method*, Selkut University, 2001.
- [Unver B., 1998] Unver B., U., M., *The Modelling of Joint Surface Roughness by Using Digital Photogrammetry*, Progress Report and Hacettepe University, 1998.
- [Upadhyay and Lyons, 1999] Upadhyay, P. C. and Lyons, J. S., *On the evaluation of critical thrust for delamination-free drilling of composite laminates*, Journal of Reinforced Plastics and Composites, **18(14)**, pp.1287-1303, 1999.
- [Velayudham et al., 2005] Velayudham, A., Krishnamurthy, R. and Soundarapandian, T., *Evaluation of drilling characteristics of high volume fraction fibre glass reinforced polymeric composite*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **45(4-5)**, pp.399-406, 2005.
- [Wang, 2000] Wang, S. H. e. a., *Laser integrated mesurement of surface roughness and micro-displacement*, Meas. Sci. Technol. 11, pp.454-458, 2000.
- [Watson, 1985] Watson, A. R., *Geometry of drill elements*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **25(3)**, pp.209-227, 1985.
- [Won and Dharan, 2002a] Won, M. S., and Dharan, C. K. H., *Chisel edge and pilot hole effects in drilling composite laminates*, Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the Asme, **124(2)**, pp.242-247, 2002a.

- [Won and Dharan, 2002b] Won, M. S. and Dharan, C. K. H., *Drilling of aramid and carbon fiber polymer composites*, Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the Asme, **124(4)**, pp.778-783, 2002b.
- [Xu et al., 2004] Xu, X. D., Lee, H. P., and Lu, C., *The Structural intensities of composite plates with a hole*, Composite Structures, **65(3-4)**, pp.493-498, 2004.
- [Yang et al., 2001] Yang, J. A., Jaganathan, V., and Du, R., *A new dynamic model for drilling and reaming processes*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, pp.299-311, 2001.
- [Zhang et al., 2001a] Zhang, L. B., Wang, L. J., and Liu, X. Y., *A mechanical model for predicting critical thrust forces in drilling composite laminates*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, **215(2)**, pp.135-146, 2001a.
- [Zhang et al., 2001b] Zhang, L. B., Wang, L. J., Liu, X. Y., Zhao, H. W., Wang, X. and Luo, H. Y., *Mechanical model for predicting thrust and torque in vibration drilling fibre-reinforced composite materials*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **41(5)**, pp.641-657, 2001b.